

# **Quantifizierung der mechanischen Spannungen infolge der Verkapselung von Sensorbauelementen**

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik  
der Technischen Universität Carola-Wilhelmina  
zu Braunschweig  
zur Erlangung des Grades einer

Doktorin der Naturwissenschaften

– Dr. rer. nat. –

genehmigte

Dissertation

von

Kathrin Friedrich

aus Paderborn

1. Referent: Prof. Andreas Hangleiter
2. Referent: Prof. Ernst O. Göbel

eingereicht am: 05.02.2009

mündliche Prüfung (Disputation) am: 20.03.2009

(2009)

# Kurzfassung

---

Die Qualität von endverpackten Sensoren hängt entschieden von der Beherrschung der mechanischen Spannungen infolge der Verkapselung ab.

In dieser Arbeit wird erstmalig über die Realisierung eines Röntgendiffraktometers berichtet, welches eine Analyse des dreidimensionalen mechanischen Spannungszustandes in Einkristallen ermöglicht, deren Oberfläche optisch und mechanisch nicht frei zugänglich ist. Mehrere innovative Ansätze mussten dazu entwickelt und verfolgt werden. Nur Röntgenstrahlung höherer Energie ( $>15$  keV), mit der es gelingt die Spritzgussverpackung der Sensoren zu durchdringen, ist als Sonde für die mechanischen Belastungen im einkristallinen Siliziumsubstrat geeignet. Die spezielle Probengeometrie erzwingt einen Übergang zu schwachen hochindizierten Braggreflexen. Ein wesentlicher Schritt der apparativen Entwicklung war daher die Optimierung des Messsignals durch die Kombination einer Molybdän-Feinfokusquelle mit einer speziell adaptierten Glaskapillaroptik. Zur reproduzierbaren Justage der unzugänglichen Chipoberfläche war die Implementierung eines Durchleuchtungssystems erforderlich. Das Diffraktometer wurde mit einem Hexapod als Probenhalter konzipiert, der durch seine kompakte Bauweise den Einbau von beliebig geformten Chipgehäusen zulässt.

Die Röntgenbeugungsanalyse dient der Verifizierung eines Kraftmesschips, der den Verpackungsprozess substituierend durchläuft und die dadurch eingprägten Spannungen über den piezoresistiven Effekt bestimmt. An verschiedenen Gehäusearten wurden sowohl röntgenographische als auch elektrische Spannungsmessungen erfolgreich durchgeführt. Beide Methoden zeigen qualitativ gut übereinstimmende Resultate.



# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Sensoren in der Automobilelektronik</b>	<b>3</b>
2.1	Sensoren für die Fahrsicherheit .....	3
2.2	Verkapselung der Sensoren .....	5
<b>3</b>	<b>Messung von Eigenspannungen</b>	<b>7</b>
3.1	Spannung und Dehnung .....	7
3.2	Piezoresistive Kraftsensorik .....	8
3.3	Röntgenographische Spannungsanalyse .....	11
<b>4</b>	<b>Das Spannungsdiffraktometer</b>	<b>15</b>
4.1	Anforderungen an das Spannungsdiffraktometer .....	15
4.2	Röntgenkapillaroptiken .....	16
4.2.1	Strahlformung mit Glaskapillaren .....	16
4.2.2	Herstellung von Glaskapillaren .....	18
4.3	Röntgenographischer Messaufbau .....	21
4.4	Justage des Diffraktometers .....	22
4.5	Temperaturstabilisierung .....	24
4.6	Messtechnik und Signalauswertung .....	26
4.7	Validierung des Aufbaus .....	29
<b>5</b>	<b>Ergebnisse der Spannungsmessung</b>	<b>33</b>
5.1	Mechanische Spannungen im SM8-Gehäuse für die Oberflächenmontage .....	33
5.2	Spannungszustand im Duroplast-PSSO4-Gehäuse .....	35
5.3	Spannungen durch sekundäre Spritzgussverpackung .....	38
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>43</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>45</b>



# Kapitel 1

## Einleitung

Die Elektronik im Automobil gewinnt immer mehr an Bedeutung. Inzwischen entfallen etwa 30 % der gesamten Produktionskosten eines Fahrzeugs auf elektronische Systeme [1]. Um den gestiegenen Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Komfort und einer besseren Umweltverträglichkeit gerecht zu werden, benötigen die elektronischen Steuergeräte diverse Informationen über den Zustand und die Umgebung des Fahrzeugs. Dazu überwachen Sensoren unterschiedlichster Technologie eine Vielzahl physikalischer Größen. Heutzutage sind in modernen Mittelklassewagen im Durchschnitt 50 Sensoren integriert, in einer Luxuslimousine sogar bis zu 100. Abbildung 1-1 soll einen Eindruck über die Fülle der Anwendungen im Automobil vermitteln.

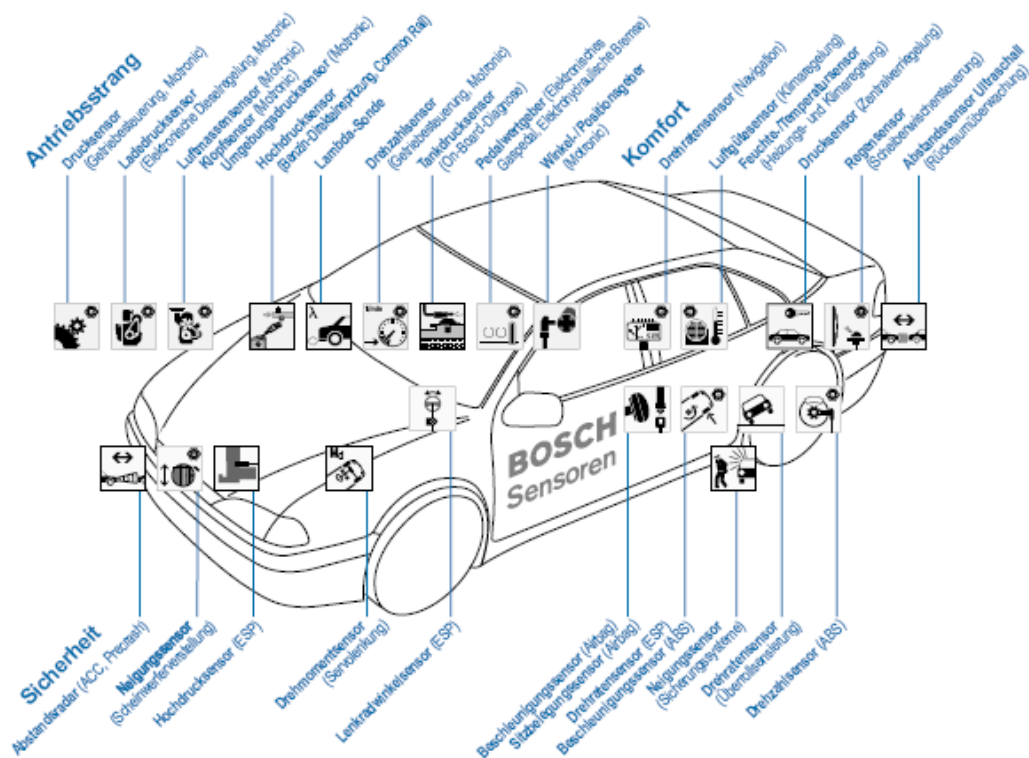


Abb.1-1: Vielfalt der Fahrzeugsysteme mit Sensoren [2]

Wesentliche Einsatzgebiete von Sensoren sind Sicherheitsfunktionen, wie das Antiblockiersystem (ABS) und das elektronische Stabilitäts-Programm (ESP),

sowie das Motormanagement und der Fahrkomfort. Sensoren für den Antriebsstrang erfassen z. B. die Drehmoment-Anforderung, Drehzahlen von Motor und Getriebe, die Luftmasse im Saugrohr, den Ansaugdruck und Temperaturen von Motorblock, Kühlmittel oder Kraftstoff. Sie tragen dazu bei, die Motoreffizienz zu erhöhen und damit den Kraftstoffverbrauch und die Schadstoffemission zu minimieren. Die Spannweite der Komfortfunktionen reicht von der Einparkhilfe, über eine automatische Regelung der Klimaanlage bis hin zum Anpassen der Scheibenwischergeschwindigkeit oder Schließen des Schiebedaches bei Regen.

An den verschiedenen Einbauorten, wie z. B. im Radlager, im Motorraum oder in der Abgasanlage sind die Sensoren harten mechanischen und klimatischen Belastungen ausgesetzt. Ein robustes Spritzgussgehäuse soll den Sensor in diesem rauen Umfeld schützen. Der Verpackungsprozess verursacht jedoch aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der im Bauelement verwendeten Materialien bleibende mechanische Spannungen. Diese Eigenspannungen können zum Bruch des Sensors und letztendlich zum Ausfall der Elektronik führen. Um den Verpackungsprozess zu optimieren ist im BMBF-Verbundvorhaben „iForceSens“ ein Kraftmesschip entwickelt worden. Er wird direkt in den Produktionsablauf eingeschleust und ermittelt die Krafteinwirkung über den piezoresistiven Effekt. Zur Verifikation des elektronischen Messverfahrens ist es erforderlich, die mechanischen Spannungen im Siliziumsubstrat der verkapselten Messchips mittels Röntgenbeugung zu bestimmen. Die Röntgenbeugung ist eine etablierte Messmethode in der zerstörungsfreien Werkstoffanalyse [3] und wird bereits an unverpackten Chipstrukturen eingesetzt [4], [5]. Aus einer Winkeländerung der Braggreflexion gegenüber dem spannungsfreien Zustand lassen sich Gitterdehnungen ermitteln und daraus Rückschlüsse auf die wirksamen Spannungen ziehen. Die Charakterisierung verpackter Chips stellt jedoch eine besondere Herausforderung an die Messtechnik dar. Mittels Synchrotron Laue Contrast Radiography (SLCR) ist die Bauteilkrümmung zugänglich [6]. Zur Bestimmung des dreidimensionalen Spannungstensors ist ein geeignetes Mikrodiffraktometer erforderlich, dessen Realisierung der wesentliche Bestandteil dieser Dissertation.

In Kapitel 2 werden zunächst einige Sensoren aus der Automobilelektronik und deren Verpackungsprozess vorgestellt. Nach einer Beschreibung der Elastizitätstheoretischen Grundlagen in Kapitel 3 folgt die Darstellung von verschiedenen Messverfahren, nämlich der piezoresistiven Kraftsensorik und der röntgenographischen Spannungsanalyse. Der detaillierte Aufbau und die Funktion des Spannungsdiffraktometers wird in Kapitel 4 präsentiert. Kapitel 5 diskutiert die Resultate der Spannungsmessungen in den verschiedenen Stadien der Chiphäusung, und die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse in Kapitel 6.



# Sensoren in der Automobilelektronik

---

In den letzten 30 Jahren hat sich in Deutschland die Anzahl der Verkehrsunfälle mit tödlichem Ausgang um zwei Drittel auf 4600 im Jahr 2008 reduziert, obwohl sich der Fahrzeugbestand über denselben Zeitraum mehr als verdreifacht hat [7]. Dieser Trend wird maßgeblich durch die Entwicklung der Sicherheitstechnik in den Autos geprägt.

## 2.1 Sensoren für die Fahrsicherheit

Meilensteine in der aktiven Fahrsicherheit wurden durch die Markteinführung des Antiblockiersystems (ABS) im Jahr 1978 und des elektronischen Stabilitäts-Programms (ESP) 1995 gesetzt. Das ABS wirkt bei starken Bremsmanövern durch eine Regelung des Bremsdrucks in kurzen Intervallen dem Blockieren der Räder entgegen. Das ESP hat die Aufgabe, mit gezielten Bremseingriffen an einzelnen Rädern ein Schleudern des Fahrzeugs zu verhindern und durch Eingreifen in die Motorleistung die notwendigen Seitenführungskräfte wieder herzustellen. Um das Fahrzeugverhalten bei Bedarf zu korrigieren, ist es erforderlich, die Messgrößen Raddrehzahl, Lenkwinkel, Drehrate, und Querbeschleunigung ständig zu überwachen und mit den Vorgaben des Fahrers zu vergleichen [8]:

### 1) Raddrehzahlsensor (Hall-Effekt)

Die notwendige Information über die tatsächliche Drehgeschwindigkeit der einzelnen Räder liefern Raddrehzahlsensoren, deren Funktion auf dem Hall-Effekt in Silizium basiert. Der Sensor wird in das Radlager integriert und die Dichtung des Radlagers zum magnetischen Multipolring erweitert, so dass das Sensorelement bei Bewegung der Räder einem ständig wechselndem Magnetfeld ausgesetzt ist. Infolge der Lorentzkraft entsteht eine Wechselspannung, deren Frequenz die Raddrehzahl widerspiegelt.

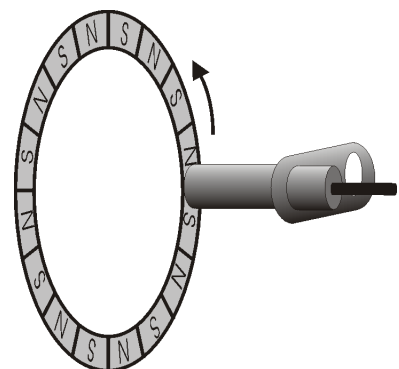


Abb.2-1:  
aktiver Drehzahlsensor  
mit Multipolring

## 2) Lenkwinkelsensor (AMR: Anisotrop Magneto Resistive)

Der Lenkwinkel kann mit Hilfe von magnetoresistiven Sensoren erfasst werden, die an der Lenkstange montiert sind. Als Sensorelement dient eine Nickel-Eisen-Schicht mit einem anisotropen elektrischen Widerstand. In Richtung eines Magnetfeldes ist er etwa 3 % höher als senkrecht dazu [8]. Das äußere Magnetfeld wird durch Magnete generiert, die von der Lenksäule über Zahnräder angetrieben werden. Werden zwei Magnete unterschiedlich schnell gedreht und die beiden gemessenen Winkel kombiniert, so können auch mehrere Lenkradumdrehungen einer eindeutigen Fahrtrichtung zugeordnet werden.

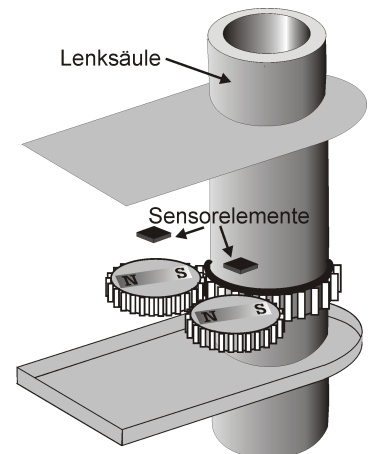


Abb.2-2:  
Explosionszeichnung eines  
AMR-Lenkwinkelsensor

## 3) Drehratensensor (Mikromechanik)

Der Drehratensensor nutzt Trägheitskräfte, um eine Bewegung des Fahrzeugs um seine Gierachse festzustellen. Der Sensor beinhaltet ein Schwingungsgyrometer, das z. B. über einen zentral gelagerten Drehschwinger realisiert werden kann. Bei Neigung des Fahrzeugs wirkt die Coriolis-Kraft auf den Schwinger senkrecht zur Gierachse und zur Bewegungsrichtung und verursacht eine Kippbewegung. Deren Amplitude wird kapazitiv detektiert und ist proportional zur Drehrate.

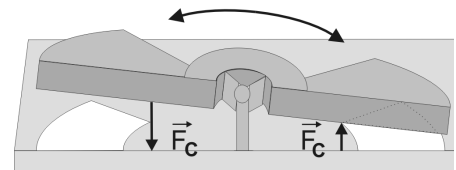


Abb.2-3:  
Drehratensensor in  
Oberflächenmikromechanik

## 4) Beschleunigungssensor (Hall-Effekt)

Der Beschleunigungssensor besteht aus einer einseitig eingespannten Bandfeder, auf deren freiem Ende ein Magnet aufgesetzt ist. Sobald eine Beschleunigung quer zur Feder auftritt, verändert diese ihre Ruhelage und der bewegte Magnet erzeugt in einem darüber angebrachten Hall-Sensor eine beschleunigungsabhängige Hall-Spannung. Je nach Einbaulage kann dieser Sensor nicht nur die für das ESP interessanten Querschleunigungen detektieren, sondern auch Längsbeschleunigungen, die sich z. B. für die Berganfahrhilfe nutzen lassen.

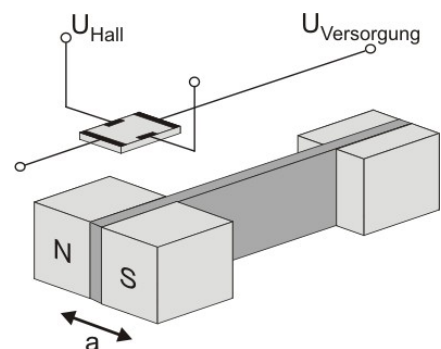


Abb.2-4:  
Hall-Beschleunigungssensor

Sensorapplikationen in der Automobilelektronik sind mitunter sehr komplex. Durch Mehrfachnutzung von Sensoren für verschiedene elektronischen Systeme, sind die Steuergeräte untereinander vernetzt, so dass bereits ein fehlerhaftes Signal eines einzelnen Sensors gegebenenfalls zum Ausfall der gesamten Boardelektronik führen kann. Um den Fahrspaß und insbesondere die Fahrsicherheit zu garantieren, wird im Automobilbau der Zuverlässigkeit von Sensoren ein hoher Stellenwert zugeschrieben.

## 2.2 Verkapselung der Sensoren

Die Sensoren sitzen zum Teil an besonders exponierten Stellen des Fahrzeugs. Bei direktem Einbau in den Motor oder in das Getriebe reicht die Belastung durch die Temperatur von unter 0 °C in der Kaltstartphase bis hin zu 150 °C. Die Sensoren müssen Stößen und Vibrationen standhalten und außerdem chemisch resistent sein gegen Spritzwasser, Streusalz, Kraftstoff, Motoröl und Batteriesäure. Zum Schutz vor diesen Umwelteinflüssen und zur besseren Handhabung wird das empfindliche Sensorelement in einem Kunststoffgehäuse verpackt.

Der Verpackungsprozess soll an dieser Stelle beispielhaft für den Raddrehzahlsensor erläutert werden. Sein Gehäuse setzt sich zusammen aus der Primärverpackung, die den Siliziumchip umhüllt und schützt und der Sekundärverpackung, die formgebend für den Sensor ist.

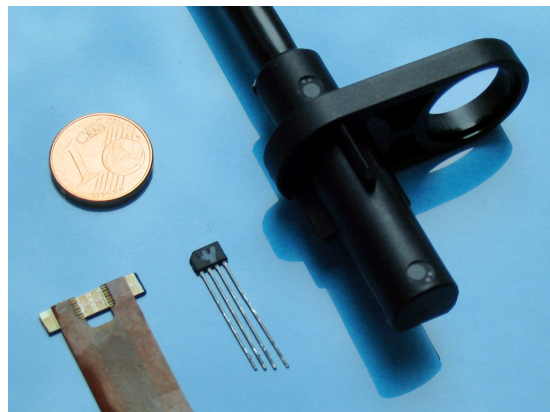


Abb.2-5: Stadien der Chiphäusung (unverpackt, primär und sekundär)

Für die Primärverpackung wurde das vierpolige Standardsteckgehäuse PSSO4 (5,3 mm × 3,7 mm × 0,7 mm) gewählt. Nachdem der Chip auf einem Chipträger aus einer Kupfer-Eisen-Legierung geklebt ist, werden die Bondkontakte auf der Chipvorderseite mit den Gehäusepins verbunden. Dann kommt der Chip in eine Pressform und ein schwarzes Duroplast wird in die Hohlräume der Form gespritzt. Typische Prozessparameter sind Temperaturen zwischen 150 °C und 200 °C, Einpritzdrücke zwischen 30 bar und 50 bar und Taktzeiten von wenigen Minuten.

Die äußere Hülle des Sensors bildet die Sekundärverpackung aus Thermoplast. Durch die kreisförmige Öffnung an der rechten Seite ist das Sensormodul leicht mit nur einer Schraube im Radlager montierbar. Abbildung 2-6 zeigt eine Durchleuchtungsaufnahme des Sekundärverpackung, die den primär verpackten Chip enthält. An der Stirnseite sitzt das PSSO4-Gehäuse mit dem Sensorelement. Die Gehäusepins werden um einen Halter aus festem Kunststoff gebogen und mit dem Anschlusskabel verlötet. Das Spritzgießen erfolgt dann bei Temperaturen von 120 °C bis 150 °C und bei Drücken von bis zu 160 bar. Dieser Vorgang dauert etwa 7 s mit einer nachfolgenden Abkühlphase von ungefähr 300 s bis auf Raumtemperatur.

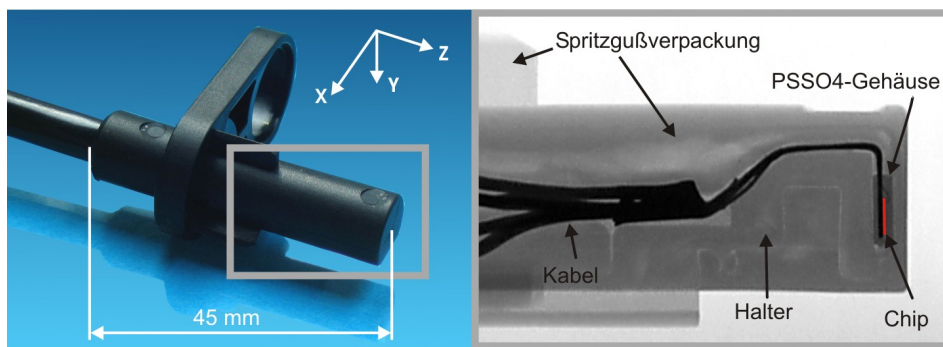


Abb.2-6: spritzgussverpackter Drehzahlsensor (links: Fotografie, rechts:Durchleuchtungsaufnahme))

Beim Herunterkühlen und Aushärten des Kunststoffs entstehen im Gehäuse Kräfte, die auf die Chipkanten und seine Oberfläche wirken. Die Ursache dafür liegt in den unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen der im Gehäuse verwendeten Materialien. Von den unterschiedlichen Materialien, wie dem Siliziumchip, dem Kleber, dem Chipträger und den Pressmassen ändern sich die Abmessungen der Kunststoffe bei Temperaturwechseln am stärksten. Der thermische Ausdehnungskoeffizient von Duroplasten und Thermoplasten ist etwa sechsmal so groß, wie der von Silizium mit  $0,259 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [8]. Aufgrund der geringen thermischen Ausdehnung von Silizium wird es in der Verbindung mit den meisten Materialien einer Kompression ausgesetzt. Zusätzlich treten aber auch Schub- und Zugkräfte auf. Die durch die Verpackungsschritte verursachten mechanischen Spannungen führen häufig zu einer Abweichung in der Funktionalität des Sensors und beeinträchtigen seine Zuverlässigkeit. Mechanische Spannungen oberhalb von 250 MPa können sogar zu einem Bruch des Siliziumchips führen. Dieser Aspekt wird zentral, wenn sicherheitsrelevante Bereiche betroffen sind.

Zur besseren Kontrolle der Verpackungsprozesse wurde das BMBF-Projekt „iForceSens“ unter Koordination der Fa. Bosch initiiert. Das Ziel des Verbundprojekts ist die Quantifizierung der dreidimensionalen Verformung von Sensorbauelementen. Denn mit der Beherrschung der Spannungsentstehung während der Verkapselung steht und fällt die Qualität der Sensoren.

## Kapitel 3

# Messung von Eigenspannungen

---

Unter Eigenspannungen versteht man mechanische Spannungen, die in einem Körper auftreten, ohne dass äußere Kräfte wirken. Viele Mikrosysteme weisen schon herstellungsbedingt Eigenspannungen auf. Insbesondere der Verpackungsprozess induziert durch seine Krafteinwirkung mechanische Spannungen und hat dadurch zum Teil einen entscheidenden Einfluss auf die Funktion und die Lebensdauer der elektronischen Komponenten.

### 3.1 Spannung und Dehnung

Der Spannungstensor  $\sigma$  ist ein Tensor zweiter Stufe, der den mechanischen Spannungszustand eines Objekts an einem bestimmten Punkt wiedergibt.

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Die Spannungskomponente  $\sigma_{ij}$  ist definiert als die Kraft  $F_i$ , die auf die Fläche  $n_j$  wirkt, dividiert durch den Flächeninhalt  $A$ .

$$\sigma_{ij} n_j = \frac{F_i}{A} \quad \text{mit } i, j \in \{1, 2, 3\} \quad (2)$$

Die Bedeutung der einzelnen Komponenten ist in Abbildung 3-1 an einem infinitesimal kleinem Volumenelement skizziert. Die Diagonalelemente des Spannungstensors beschreiben die Normalspannungen, die senkrecht zu den Flächen wirken. Je nach Vorzeichen handelt es sich um eine Zugspannung (+) oder eine Druckspannung (-). Die Nichtdiagonalelemente stellen eine Belastung parallel zu einer Fläche dar. Sie beschreiben die Scherung bzw. Torsion [10].

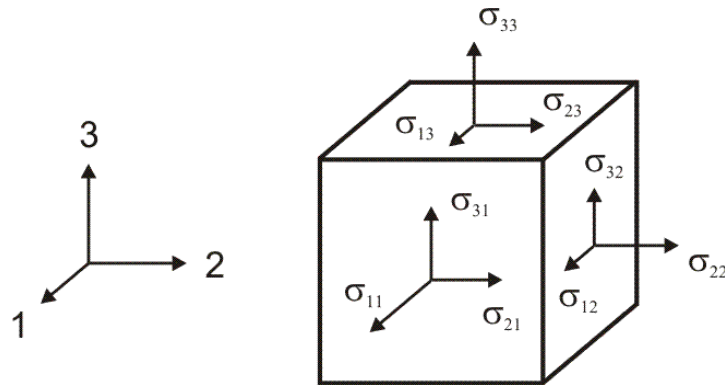


Abb.3-1: Definition der Spannungskomponenten an einem rechteckigen Volumenelement

Aus der Forderung der Drehimpulserhaltung im statischen Gleichgewicht folgt die Symmetrie des Spannungstensors [11].

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (3)$$

Somit reichen sechs der insgesamt neun Komponenten aus, um einen Spannungszustand vollständig zu charakterisieren.

Im elastischen Bereich besteht über das Hookesche Gesetz ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (4)$$

Hierdurch wird der Tensor der Elastizitätsmoduln mit 81 Komponenten  $C_{ijkl}$  definiert. Da der Spannungs- wie auch der Dehnungstensor symmetrisch sind, lässt sich auch der Tensor der Elastizitätsmoduln symmetrisch schreiben und in der gebräuchliche Voigtschen Notation durch eine  $6 \times 6$  Matrix mit den Komponenten  $C_{nm}$  ersetzen [12]. Unter Ausnutzung von Symmetrieeigenschaften des Kristallgitters wird die Anzahl der unabhängigen Komponenten weiter reduziert. Im kubischen Kristallsystem, verbleiben lediglich die drei Komponenten  $C_{11}$ ,  $C_{44}$  und  $C_{12}$ .

## 3.2 Piezoresistive Kraftsensorik

Eigenspannungen rufen Änderungen des Kristallgitters hervor und dadurch erfahren eine Reihe von physikalischen Materialeigenschaften einen messbaren Einfluss. Mechanische, elektrische, magnetische und Ultraschallkenngrößen können mit mechanischen Spannungen korreliert werden [12].

Beim piezoresistiven Effekt resultieren mechanische Spannungen in einer Änderung des spezifischen Widerstandes [13]. Die Widerstandsänderung  $\Delta R/R$  in einem Halbleiter wird dabei nicht nur durch den Einfluss der Dimensionen, sondern im Wesentlichen durch die veränderte Ladungsträgerbeweglichkeit  $\Delta\mu/\mu$  hervorgerufen. In n-dotiertem Silizium führt die Dehnung des Kristalls zu einer leichten Änderung der Bandstruktur und einer damit verbundenen Verschiebung der Elektronendichten in den verschiedenen Tälern des Leitungsbandes. In p-dotiertem Silizium basiert die Widerstandsänderung im gedehnten Kristall auf einer Aufhebung der Entartung der Energiezustände von schweren und leichten Löchern. Der piezoresistive Effekt wurde in den frühen 1980er Jahren zum ersten Mal von der Firma Texas Instruments ausgenutzt, um produktionsbedingte Spannungen in Mikrosystemen zu kontrollieren [14].

Auf dieser Basis ist im BMBF-Projekt „iForceSens“ ein Kraftmesschip entwickelt worden. Als Elementarsensoren werden MOSFETs (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) verwendet. Der Kanal eines MOSFETs unterscheidet sich im Inversionsbetrieb prinzipiell nicht vom eigentlichen Halbleitermaterial. Die Dehnungsantwort wird als die Änderung des Drainstroms  $\Delta I/I$  aufgrund einer Belastung moduliert [15]

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta\mu}{\mu} \approx - \frac{\Delta R}{R} \quad (5)$$

Feldeffekttransistoren können routinemäßig im Mikrometerbereich produziert werden, so dass durch eine Anordnungen in Matrixform auch orts aufgelöste Messungen über die gesamte Chipoberfläche möglich sind.

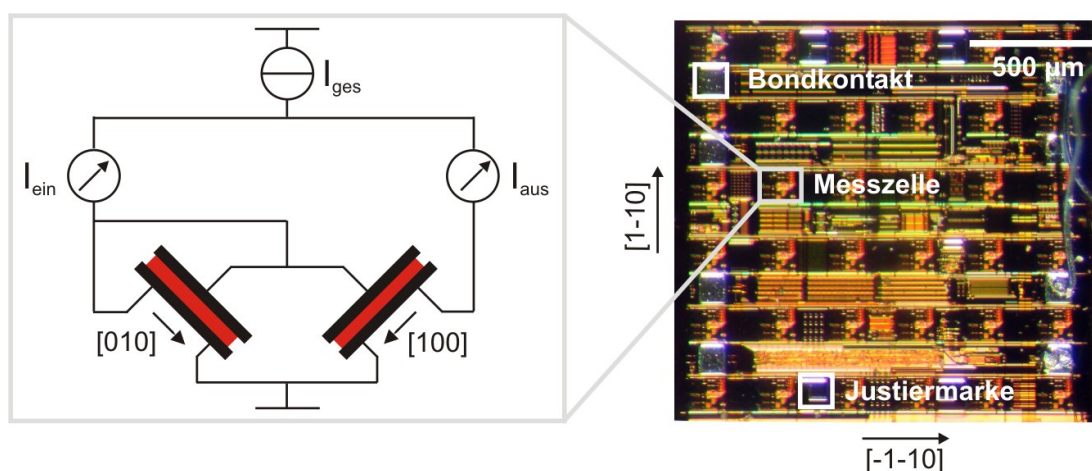


Abb.3-2: Stromspiegel, bestehend aus zwei nMOSFETs in Parallelschaltung

Die Mikrostrukturierung umfasst ein Array aus  $200\text{ }\mu\text{m} \times 160\text{ }\mu\text{m}$  großen Messzellen, die jeweils einen nMOS- und einen pMOS-Stromspiegel beinhaltet. Auf

einem 8-Zoll-Wafer wurden 4200 Kraftmesschips in vier verschiedenen Geometrien realisiert. Abbildung 3-2 zeigt beispielhaft für eine Variante, dass die Kanäle des nMOSFETs parallel zu den Kristallrichtungen  $[1\ 0\ 0]$  und  $[0\ 1\ 0]$  liegen und die Kanäle des pMOSFETs parallel zu den Richtungen  $[1\ 1\ 0]$  und  $[-1\ 1\ 0]$  verlaufen. Der Ausgangstransistor ist in beiden Fällen gegenüber dem Eingangstransistor um  $90^\circ$  gedreht.

Ausgehend von der über den piezoresistiven Effekt spannungsabhängigen Ladungsträgerbeweglichkeit können detaillierte Beziehungen zwischen den Stromspiegelsignalen und den mechanischen Spannungseinträgen abgeleitet werden [16]. Beide Zweige der Stromspiegel werden parallel verschaltet und mit einem gemeinsamen konstanten Strom gespeist. Über eine Messung der Aufteilung des Gesamtstroms auf den Eingangs- und den Ausgangszweig des Stromspiegels können Rückschlüsse auf den Eigenspannungszustand gezogen werden. Im stressfreien Zustand erfolgt eine symmetrische Aufteilung [17].

Aus der relativen Differenz von Ausgangs- und Eingangsstrom ( $I_{\text{aus}}$  und  $I_{\text{ein}}$ ) der nMOS-Stromspiegel berechnet sich die Scherspannungskomponente  $\sigma_{12}$

$$\sigma_{12} \approx - \frac{1}{\pi_{11}^{(n)} - \pi_{12}^{(n)}} \frac{I_{\text{aus}} - I_{\text{ein}}}{I_{\text{aus}} + I_{\text{ein}}} \quad (6)$$

mit den piezoresistiven Koeffizienten  $\pi_{11}^{(n)} - \pi_{12}^{(n)} = -765 \text{ TPa}^{-1}$  (bei  $25^\circ\text{C}$ ) [18] des n-dotierten Silizium.

Analog dazu liefern die orthogonal angeordneten pMOS-Transistoren die Differenz der Normalspannungen  $\sigma_{11}-\sigma_{22}$

$$\sigma_{11} - \sigma_{22} \approx \frac{2}{\pi_{44}^{(p)}} \frac{I_{\text{aus}} - I_{\text{ein}}}{I_{\text{aus}} + I_{\text{ein}}} \quad (7)$$

mit dem piezoresistiven Koeffizienten  $\pi_{44}^{(p)} = 1000 \text{ TPa}^{-1}$  (bei  $25^\circ\text{C}$ ) [18] für p-dotiertes Silizium.

Aus einfachen elektrischen Messungen ist es also möglich die Differenz der Normalspannungskomponenten  $\sigma_{11}-\sigma_{22}$  und die Scherspannungskomponente  $\sigma_{12}$  in der Chipoberfläche zu rekonstruieren.

Für die Summe der Normalkomponenten  $\sigma_{11}+\sigma_{22}$  gilt mit  $\pi_{11}^{(n)} + \pi_{12}^{(n)} = -520 \text{ TPa}^{-1}$  [19]:

$$\sigma_{11} + \sigma_{22} \approx \frac{2}{\pi_{11}^{(n)} + \pi_{12}^{(n)}} \left( 1 - \frac{I_{\text{ein}} + I_{\text{aus}}}{2I_0} - \pi_{12} \sigma_{33} \right) \quad (8)$$

Diese Beziehung ist jedoch nur anwendbar, falls die Spannungskomponente  $\sigma_{33}$  entweder vernachlässigbar klein oder ihre Messung mit einer anderen Methode möglich ist. Sind die Summe als auch die Differenz der Normalspannungen



bekannt, können daraus Rückschlüsse auf die einzelnen Komponenten  $\sigma_{11}$  und  $\sigma_{22}$  gezogen werden.

Der Kraftmesschip dient der Überwachung der Elektronikverkapselung und wird dazu in etablierte Fertigungslinien integriert. Er durchläuft substituierend für die Magneto- und Inertialsensoren alle relevanten Prozessschritte, die zur Verpackung von Mikrosystemen eingesetzt werden, und dient so als Sonde für den mechanischen Einfluss auf das zu verpackende Element. Die nach den Gleichungen (6) bis (8) berechneten Spannungen stellen absolute Werte in Bezug auf den spannungsfreien Zustand dar. Der eigentliche Bezugspunkt ist jedoch der Ausgangszustand unmittelbar vor Beginn des zu untersuchenden Belastungsprozesses. Eine bereits vorhandene Eigenspannung durch z.B. die Primärverpackung ist hier nicht berücksichtigt. Ein wesentlicher Vorteil der piezoresistiven Kraftsensorik ist die kurze Messzeit. Das Auslesen einer Messzelle dauert nur etwa 35 ms. Damit ist dieses Verfahren sogar für eine in situ Charakterisierung während des Verpackungsprozesses einsetzbar.

### 3.3 Röntgenographische Spannungsanalyse

Die röntgenographische Spannungsanalyse ist die am häufigsten verwendete Methode zur zerstörungsfreien Ermittlung von Eigenspannungen. Sie ist geeignet, um triaxiale Spannungszustände im einkristallinen Siliziumsubstrat der Kraftmesschips zerstörungsfrei zu bestimmen. Die röntgenographische Messung wird hier als Referenzuntersuchung eingesetzt und soll das elektronische Messverfahren verifizieren.

Die elastische Streuung der Röntgenphotonen an den Elektronen der Atome, die in einem Kristallverbund angeordnet sind, bildet die Grundlage der Röntgenbeugung. Die Röntgenstrahlung wird an den Netzebenen des Kristalls teilweise reflektiert, und die reflektierten Strahlen interferieren miteinander. Ein Reflex wird unter dem so genannten Bragg-Winkel  $\theta$  nur dann beobachtet, wenn die Bedingung der konstruktiven Interferenz erfüllt wird. Dies führt auf die Braggsche Reflexionsbedingung:

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin\theta \quad (9)$$

$n$  entspricht der Beugungsordnung,  $d$  dem Netzebenenabstand und  $\lambda$  der Wellenlänge der Röntgenstrahlung.

Mechanische Spannungen verändern die Netzebenenabstände und damit auch den Beugungswinkel, so dass sich die Interferenzlinien verschieben. Durch Differenzieren der Bragg-Gleichung (9) ergibt sich ein Zusammenhang zwischen der Linienverschiebung  $\Delta\theta$  und der Dehnung  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d} = -\Delta\theta \cdot \cot\theta \quad (10)$$

Auf diese Art und Weise können Aussagen über die Dehnung in Messrichtung getroffen werden [16].

Da die elastischen Eigenschaften mit Bezug auf das kristallographische Koordinatensystem angegeben werden, ist eine Koordinatentransformation durchzuführen. Das Laborkoordinatensystem L, in dem das Beugungsexperiment stattfindet, ist um die Winkel  $\phi$  und  $\psi$  gegenüber dem Probenkoordinatensystem P verkippt.

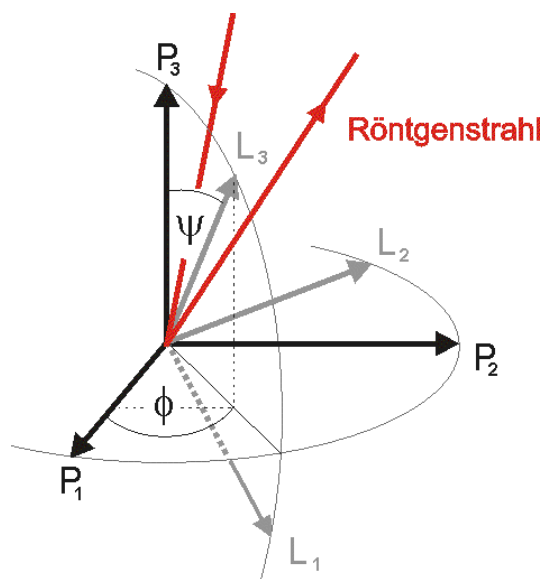


Abb.3-3: Definition des Laborkoordinatensystems L und des Probenkoordinatensystems P

Die Transformation des symmetrischen Dehnungstensors  $\varepsilon$  erfolgt mit der Drehmatrix a

$$a = \begin{pmatrix} \cos\phi \cos\psi & \sin\phi \cos\psi & -\sin\psi \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ \cos\phi \sin\psi & \sin\phi \sin\psi & \cos\psi \end{pmatrix} \quad (11a)$$

nach folgender Vorschrift:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = a_{3k} a_{3l} \varepsilon_{kl} \quad (11b)$$

Damit kann die Dehnung  $\varepsilon_{\phi\psi}$  in Messrichtung durch die Elemente des Dehnungstensors beschrieben werden.

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{\phi\psi} = & \varepsilon_{11} \cos^2 \phi \sin^2 \psi + \varepsilon_{12} \sin 2\phi \sin^2 \psi \\
& + \varepsilon_{22} \sin^2 \phi \sin^2 \psi + \varepsilon_{33} \cos^2 \psi \\
& + \varepsilon_{13} \cos \phi \sin 2\psi + \varepsilon_{23} \sin \phi \sin 2\psi
\end{aligned} \tag{12}$$

In der Literatur wird dieser Zusammenhang als Grundgleichung der röntgenographischen Spannungsanalyse bezeichnet [20].

Die Probenkoordinaten  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  entsprechen den Kristallrichtungen  $[1\ 0\ 0]$ ,  $[0\ 1\ 0]$  und  $[0\ 0\ 1]$ . Die Dehnungskomponente senkrecht zur Probenoberfläche  $\varepsilon_{33}$  ist dann direkt über die Messung von nur einem symmetrischen Reflex zugänglich. Je größer der Winkel  $\psi$  ist, desto mehr Information kann über die Dehnung in der Chipebene gewonnen werden und desto genauer können die Komponenten  $\varepsilon_{11}$ ,  $\varepsilon_{22}$  und  $\varepsilon_{12}$  kalkuliert werden.

Zur Bestimmung des vollständigen dreidimensionalen Dehnungstensors ist eine Aufnahme von mindestens sechs unabhängigen Braggreflexen erforderlich. Werden mehr als sechs Reflexe vermessen, ist eine Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate durchzuführen [21].

Mit diesen experimentell zugänglichen Dehnungsfeldern lassen sich über das Hookesche Gesetz (4) die Spannungskomponenten berechnen.

Im kubischen Kristallsystem, wie im Fall von Silizium, sind Spannung und Dehnung wie folgt verknüpft [22]:

$$\begin{aligned}
\sigma_{ii} &= C_{11}\varepsilon_{ii} + C_{12}(\varepsilon_{jj} + \varepsilon_{kk}) \\
\sigma_{ij} &= 2C_{44}\varepsilon_{ij} \quad (i \neq j)
\end{aligned} \tag{13}$$

mit den elastischen Koeffizienten bei Raumtemperatur [23]:

$$\begin{aligned}
C_{11} &= 1,6564 \cdot 10^{11} \text{ Pa} \\
C_{12} &= 0,6394 \cdot 10^{11} \text{ Pa} \\
C_{44} &= 0,7951 \cdot 10^{11} \text{ Pa}
\end{aligned}$$

Die röntgenographische Spannungsanalyse ergänzt die piezoresistive Kraftsensorik in besonderer Weise. Denn sie ermöglicht die zerstörungsfreie Messung aller sechs Komponenten, die nötig sind, um einen Spannungszustand vollständig zu beschreiben. Neben der Verifikation der Kraftmesschips, die Informationen über die Spannungskomponenten in der Chipebene liefern, können mit dieser Methode auch Aussagen über die Spannungskomponenten senkrecht dazu getroffen werden.

Die Oberfläche des Kraftmesschips wird durch die Kristallrichtungen  $[-1\ -1\ 0]$  und  $[1\ -1\ 0]$  aufgespannt. Das Röntgenbeugungsexperiment liefert den Spannungstensor allerdings mit den Hauptkomponenten in  $[1\ 0\ 0]$ -,  $[0\ 1\ 0]$ - und

[0 0 1]-Richtung. Zum direkten Vergleich der beiden Ergebnisse wird deswegen der röntgenographisch ermittelte Spannungstensor um den Winkel  $\phi=45^\circ$  gedreht.

## Kapitel 4

# Das Spannungsdiffraktometer

---

Diffraktometer mit einem Probenhalter zum Kippen der Probe sind zur röntgenographischen Spannungsanalyse von Einkristallen geeignet. Im Gegensatz zum Laue-Verfahren können damit auch hydrostatische Volumenänderungen der Elementarzelle festgestellt werden.

### 4.1 Anforderungen an das Spannungsdiffraktometer

Die Röntgenbeugungsanalyse im einkristallinen Siliziumsubstrat der Sensoren erfolgt durch ein speziell entwickeltes Mikrodiffraktometer, welches an die Anforderungen zur Charakterisierung verpackter Chips angepasst ist:

1) Röntgenenergie > 15 keV

Nur mit harter Röntgenstrahlung gelingt es, die Spritzgussverpackung der Sensoren zu durchdringen. Da Synchrotronstrahlung lediglich in zeitlich sehr eingeschränkten Messperioden nach einem Antrag mit langer Vorlaufzeit genutzt werden kann, wird für dieses Experiment eine Röntgenquelle mit Molybdänanode eingesetzt, die charakteristische Strahlung bei Energien oberhalb von 17,37 keV emittiert. Die Absorptionslänge der Molybdänstrahlung in Kunststoff beträgt etwa 15 mm (Einfallswinkel: 40°). Im Vergleich dazu kommt es bei der häufig für Spannungsanalysen eingesetzten Chromstrahlung (<6 keV) schon nach 0,5 mm zu einem Intensitätsabfall auf den Bruchteil 1/e.

2) hohe Intensität der Beugungsreflexe

Um die Absorption durch das Gehäuse zu minimieren, muss die Reflexion der Röntgenstrahlung an der Chipoberfläche unter möglichst steilen Braggwinkeln erfolgen. Durch die spezielle Probengeometrie steht der Messung lediglich ein Winkelbereich zwischen 30° und 75° zur Verfügung. Damit ist ein Übergang zu schmalen hoch indizierten Reflexen unumgänglich. Die schwache Intensität in den höheren Beugungsordnungen soll durch die Kombination einer Mikrofokusquelle mit einer fokussierenden Glaskapillare maximiert werden. Durch die Adaption einer geeigneten Optik werden typische Reflexintensitäten von 500 Photonen pro Sekunde erreicht.

### 3) großes Probenvolumen

Der Einsatz eines Hexapods als Probenhalter in einem konventionellen Vier-Kreis-Diffraktometer bietet einen variablen Probenraum für Sensoren unterschiedlichster Form und Größe. Zudem erlaubt diese Anordnung ein einfaches Abscannen der Bauteile.

### 4) reproduzierbare Probenjustage

Die Chipoberfläche der verpackten Proben ist nicht zur optischen oder mechanischen Antastung zugänglich. Eine reproduzierbare Justage im Strahlengang wird durch ein Durchleuchtungssystem mit CCD-Kamera gewährleistet.

Mit dem Röntgendiffraktometer sollen mechanischen Spannungen im Bereich von  $\pm 5$  MPa aufgelöst werden können. Dies entspricht Dehnungen von  $\pm 5 \cdot 10^{-5}$  und nach Gleichung (10) einer geforderten Auflösung der Braggwinkelmessung von  $\pm 0,001^\circ$  bis  $\pm 0,008^\circ$  in Abhängigkeit der jeweils betrachteten Netzebene.

## 4.2 Röntgenkapillaroptiken

### 4.2.1 Strahlformung mit Glaskapillaren

Röntgenstrahlung kann durch Glaskapillaren verschiedener Formen fokussiert bzw. kollimiert werden. Dieser Typ von Röntgenoptik wurde erstmalig um 1950 experimentell eingesetzt [24] und durch die Arbeiten von Engström, Bilderback und Bjeoumikhov weiterentwickelt [25-27]. Der Röntgenstrahl wird durch Totalreflexion an der Glassinnenwand weitergeleitet und geformt. Der Brechungseffekt ist jedoch gering. Der Grenzwinkel der Totalreflexion liegt für Molybdän  $K_\alpha$ -Strahlung selbst für Bleiglas bei nur  $0,13^\circ$ . Dadurch ist die Geometrie der Kapillaren lang gestreckt mit Längen von 10 cm bis 30 cm und typischen Innendurchmessern von  $40 \mu\text{m}$  bis  $200 \mu\text{m}$ .

Abbildung 4-1 zeigt schematisch wie ein divergentes Strahlenbündel durch mehrfache Reflexion in einer konisch auslaufenden Kapillare parallelisiert wird.

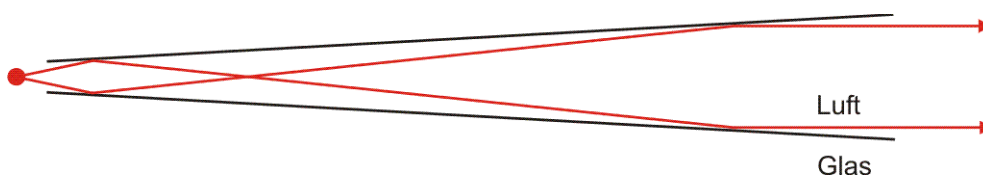


Abb.4-1: Strahlenverlauf in einer konisch auslaufenden Kapillare

Der divergente Röntgenstrahl tritt an der linken Seite ein. Bei jeder Reflexion verringert sich der Divergenzwinkel des Strahls um das Doppelte des Winkels der Kapillareninnenwand zur optischen Achse.

Mit Hilfe eines Raytracing-Programms werden die Optiken für die jeweilige Anwendung optimiert. Das Programm ermöglicht eine dreidimensionale Simulationen zu elliptischen, zylindrischen, parabolischen sowie konischen Formen. Die Quellpunktgröße, die Abmessungen der Kapillare und die Beobachtungsebene sind vom Benutzer frei wählbar. Außerdem können Fehljustagen und die Verwendung von Spalten und Blenden behandelt werden.

Für die Anwendung im Spannungsdiffraktometer sind sowohl das räumliche Strahlprofil als auch die Winkelverteilung ausschlaggebende Faktoren der Optimierung.

Die angestrebte Ortsauflösung soll mit der Größe der einzelnen Messzellen des Kraftmesschips vergleichbar sein, d.h. am Ort der Probe in 300 mm Abstand zu Röntgenquelle sollte ein Fokus von  $200\text{ }\mu\text{m}$  vorliegen. Als Strahlungsquelle dient eine Mikrofokusröhre mit einer Brennfleckausdehnung von  $30\text{ }\mu\text{m}$  bei einer Intensität von 30 W. Der minimale Abstand zwischen dem Brennfleck und der Optik beträgt 6 mm. Unter diesen Bedingungen wird ein optimales Ergebnis durch eine elliptische Kapillare mit einer großen Halbachse von  $a=150\text{ mm}$  und einer kleinen Halbachse von  $b=150\text{ }\mu\text{m}$  erreicht.

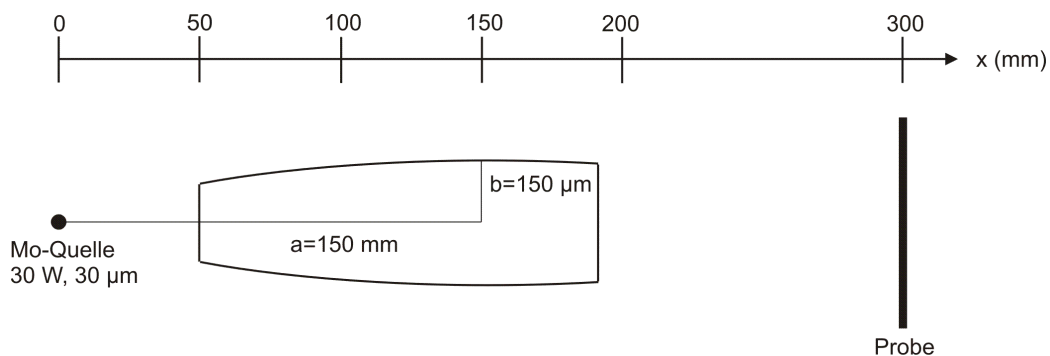


Abbildung 4-2: Dimension und Lage der Kapillaroptik im Strahlengang

Wie in Abbildung 4-2 skizziert, wird die Kapillare 50 mm von der Röntgenquelle entfernt in den Strahlengang gebracht. In 190 mm Entfernung befindet sich die Austrittsöffnung. Das Ergebnis der Simulation ist in Abbildung 4-3 gezeigt. Für Mo- $K_{\alpha 1}$ -Strahlung ergibt sich im Fokus ein Strahlprofil mit einer räumlichen Ausdehnung von etwa  $80\text{ }\mu\text{m}$ .

Die Winkeldivergenz der Röntgenstrahlung nach dem Durchgang durch die Kapillaroptik hat einen wesentlichen Einfluss auf das Auflösungsvermögen des Diffraktometers. Die zu erwartende Winkelverteilung der in Abbildung 4-2 dargestellten elliptischen Kapillare ist  $0,1^\circ$  breit mit einer maximalen Intensität von 11.000 Photonen/(sec arcsec).

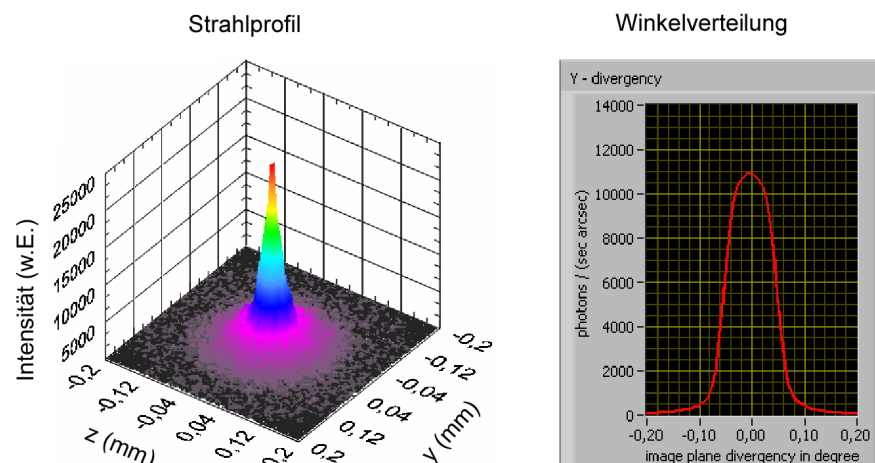


Abbildung 4-3: berechnete räumliche (links) und winkeldispersive Intensitätsverteilung (rechts) für eine elliptische Kapillare ( $a=150 \text{ mm}$ ,  $b=150 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $140 \text{ mm}$  lang, Abstand zur Quelle:  $50 \text{ mm}$ )

Das tatsächliche Reflexionsvermögen einer Glaskapillare hängt in der Praxis allerdings stark von der optischen Güte der Grenzflächen ab [28].

## 4.2.2 Herstellung von Glaskapillaren

Als Ausgangsmaterial dienen industriell vorgefertigte Zylinderkapillaren aus Borosilikatglas (Fa. Hilgenberg GmbH) mit einer hohen Ebenheitsqualität der Kapillareninnenfläche. Für die Herstellung geeigneter Formen wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Kapillarziehmaschine entwickelt.

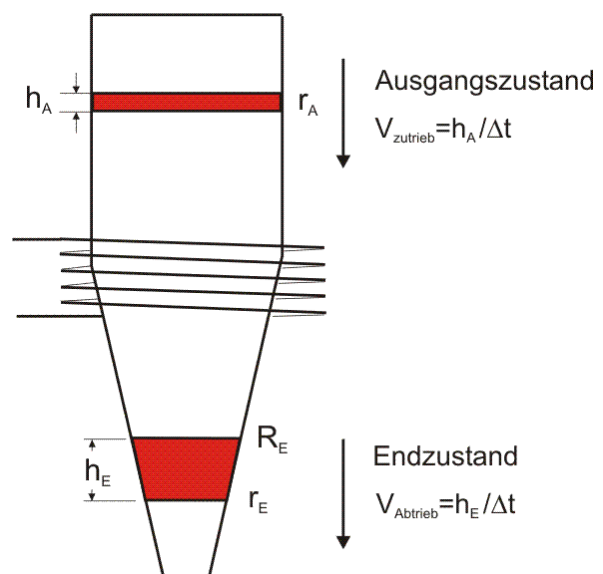
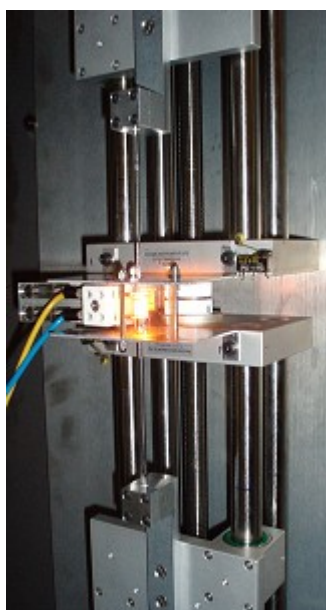


Abbildung 4-4: Ziehmaschine zur Herstellung von Kapillaroptiken (links), Einteilung der Kapillarform in Volumenelemente (rechts)



Sie besteht im Wesentlichen aus zwei Linearverschiebetischen und einer Heizwendel aus vier Wicklungen Aluchromdraht. Bei einem angelegten Strom von 5 A erhitzt sich der Bereich im Inneren der Heizwendel auf etwa 800 °C. Diese Temperatur führt zum Erweichen von Borosilikatglas. Die Ofentemperatur bestimmt zusammen mit der Geschwindigkeit des Zutriebs das Fließverhalten des Glases. Für den Zutrieb wird eine konstante Geschwindigkeit von 25 mm/min vorgewählt. Die Abtriebsgeschwindigkeit kann während des Ziehprozesses von 0,1 – 25 mm/min in 250 Getriebestufen variiert werden.

Zur mathematischen Modellierung des Ziehvorgangs wird die Form der Glaskapillare im Ausgangs- (A) sowie im Endzustand (E) durch kleine Volumenelemente approximiert. Aufgrund der Massenerhaltung darf sich auch das Volumen der Elemente durch das Ziehen nicht ändern ( $V_A = V_E$ ). Für eine konische Kapillare beispielsweise gilt mit der Nomenklatur aus Abbildung 4-4:

$$h_A \cdot \pi \cdot r_A^2 = h_E \cdot \frac{1}{3} \pi \cdot (r_E^2 + r_E R_E + R_E^2) \quad (14)$$

das Ziehprogramm berechnet dann aus den Radien von Ausgangsmaterial und geplanter Endform der Kapillare das momentane Verhältnis der einzustellenden Abtriebs- und Zutriebsgeschwindigkeiten und gibt diese Information an die Schrittmotorsteuerung weiter.

$$\frac{v_{\text{Zutrieb}}}{v_{\text{Abtrieb}}} = \left( \frac{r_E^2 + r_E R_E + R_E^2}{3 \cdot r_A^2} \right) \quad (15)$$

Mit diesem Verfahren wurden konische und elliptische Kapillaren erhalten, die in ihrer Form der idealen Geometrie gleichkommen.

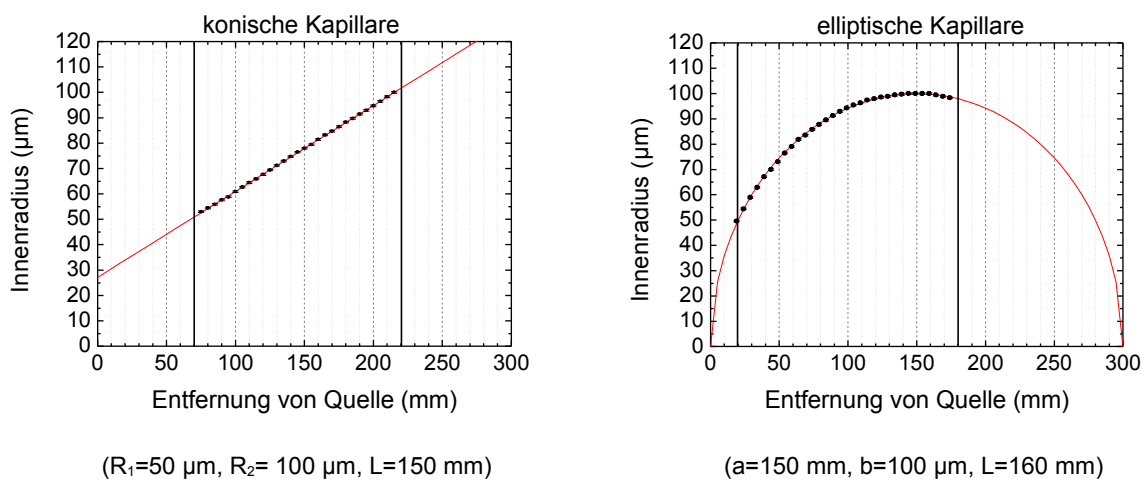


Abbildung 4-5: Geometrie einer konisch (links) und einer elliptisch (rechts) gezogenen Kapillare

Der Außendurchmesser wurde mit einem Messschieber bis auf  $\pm 0,01$  mm bestimmt. Das gemessene Profil ist ausgehend von dem Innendurchmesser des Rohmaterials von  $200\text{ }\mu\text{m}$  auf den inneren Radius skaliert worden und in Abbildung 4-5 über dem Abstand von der Quelle bis zur Position der Probe aufgetragen. Der Eintrittsdurchmesser der konisch auslaufenden Kapillare beträgt  $100\text{ }\mu\text{m}$ , der Austrittsdurchmesser  $200\text{ }\mu\text{m}$  und die Länge  $150\text{ mm}$ . Die Kapillare wird in einer Entfernung von  $70\text{ mm}$  von der Röntgenquelle im Strahlengang positioniert, so dass nur eine Reflexion stattfindet. Die Beobachtungsebene liegt bei  $300\text{ mm}$ .

Abbildung 4-6 zeigt die simulierte räumliche Intensitätsverteilung im Vergleich zum Kamerabild des Direktstrahls der konisch auslaufenden Glaskapillare. Nach dem Durchgang durch die Optik entspricht die Form des Röntgenstrahls dem berechneten Profil. In beiden Fällen zeigt sich ein Fokusbereich von  $400\text{ }\mu\text{m}$ .

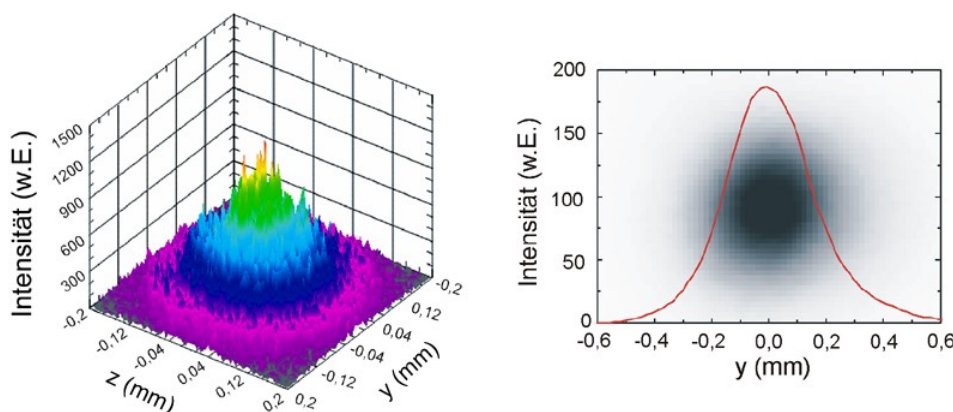


Abbildung 4-6: Strahlprofil der konisch auslaufenden Kapillare, links: Simulation der räumlichen Intensitätsverteilung, rechts: Kamerabild des Direktstrahls und Linescan durch den Fokus

Von praktischer Bedeutung für das Röntgenbeugungsexperiment ist neben der räumlichen Verteilung der Intensität auch die Winkelverteilung. Die Winkelverteilung wird aus der Beugung über einen geätzten spannungsfreien Siliziumkristall erhalten. In Abbildung 4-7 ist die gemessene Rockingkurve des (0 0 4)-Reflexes der Raytracing-Simulation gegenübergestellt. Die Halbwertsbreite der Rockingkurve entspricht, da die intrinsische Darwin-Breite ( $0,00002^\circ$ - $0,00004^\circ$ ) des Kristalls vernachlässigbar ist, der Winkeldivergenz. Die gemessene Winkelverteilung ist mit einer Halbwertsbreite von  $0,06^\circ$  im Vergleich zur Simulation, die eine Reflexbreite von drei bis vier Zehntel Grad angibt, etwas verbreitert. Die gemessene Intensität erreicht im Maximum bis zu  $80\%$  der erwarteten. Die Simulation geht von ideal gefertigten Kapillaren aus. Nicht optimal glatte innere Oberflächen oder ein nicht exakt linearer Ziehprozess können Ursache für den Intensitätsverlust sein. Möglicherweise haben auch leichte

unkontrollierbare Temperaturschwankungen während der Herstellung zu einer Welligkeit der Kapillarinnenwand geführt.

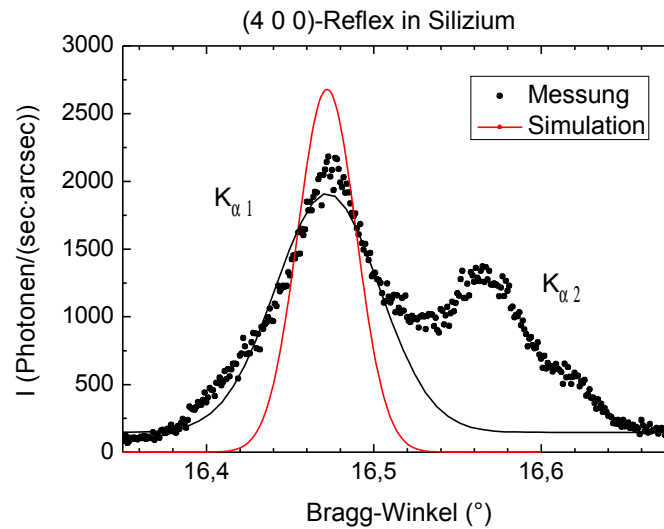


Abbildung 4-7: Winkelverteilung der konischen Kapillare

### 4.3 Röntgenographischer Messaufbau

Das verwendete Mikrodiffraktometer besteht aus den folgenden Hauptkomponenten: Mikrofokusquelle, Glaskapillaroptik, 4-Kreis-Diffraktometer, Hexapod und Detektoren. Abbildung 4-8 zeigt eine Foto des Aufbaus.

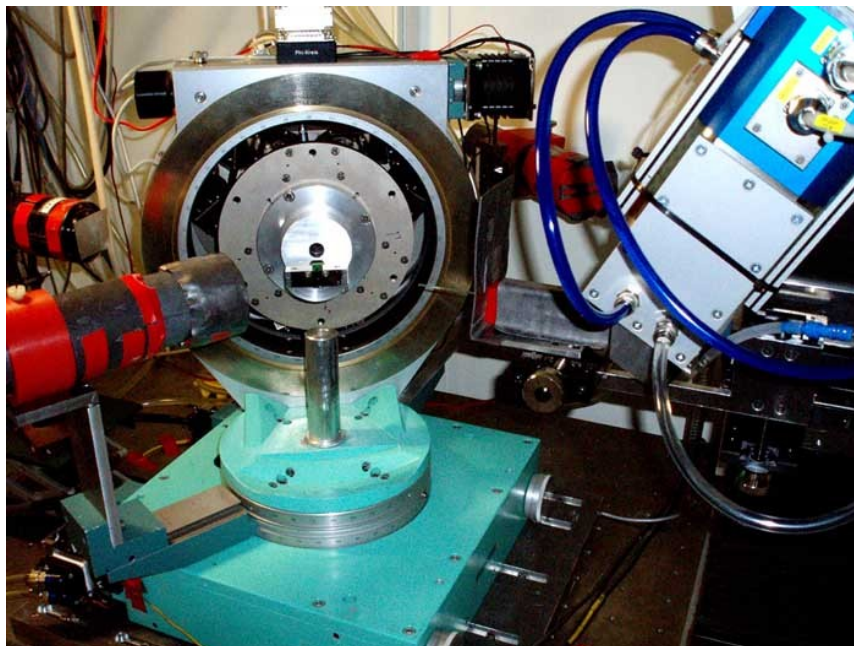


Abbildung 4-8: röntgenographischer Messaufbau

Als Strahlungsquelle dient eine Mikrofokusröntgenröhre mit Molybdäntarget der Fa. FeinFocus mit einstellbaren Fokusparametern. Die maximal erreichbare Leistung beträgt 100 W bei einer Beschleunigungsspannung von 100 kV und einem Anodenstrom von 1 mA. In Abhängigkeit der Leistung ändert sich der Durchmesser des Brennflecks. Für die Spannungsmessung werden typische Betriebsparameter von 60 kV und 0,5 mA, also 30 W gewählt. Dies entspricht einer Brennfleckausdehnung von etwa 30  $\mu\text{m}$ .

Die erzeugte Strahlung wird mit Hilfe einer Glaskapillaroptik fokussiert. Die Kapillare besitzt eine elliptische Form mit einer kleinen Halbachse von 150  $\mu\text{m}$  und einer großen Halbachse von 150 mm wie in Abbildung 4-2 skizziert. Die Justage erfolgt über drei manuelle Verschiebetische in xyz-Anordnung. Am Ort der Probe wird so ein Röntgenstrahl mit einem Durchmesser von 160  $\mu\text{m}$  erzeugt.

Die Reflexe werden mit einem Photomultiplier in einem konventionellen Vier-Kreis-Diffraktometer (Modell 424-511.1) der Fa. Huber abgetastet. Eine Messroutine synchronisiert die Diffraktometersteuerung mit der Datenerfassung des Multipliers. Alle Achsen werden mit 5-Phasen-Schrittmotoren angetrieben und können im Halbschrittbetrieb mit einer Auflösung von einem tausendstel Grad verfahren werden. Die Umkehrspanne der Winkelachsen wurde mit einem induktiven Taster auf drei tausendstel Grad bestimmt. Die vier Füße des Diffraktometers sind durch eine massive 30 mm starke Aluminiumplatte ersetzt worden, wodurch die Neigung des Diffraktometersockels bei Drehung der Braggwinkelachse von mehreren Winkelminuten auf 15 Winkelsekunden herabgesetzt werden konnte.

Zur Positionierung der Proben wurde einer der insgesamt vier Diffraktometerkreise durch einen Hexapod (Modell M-824) der Fa. Physik Instrumente (PI) ersetzt. Der Hexapod lässt eine Probenmanipulation in sechs Achsen zu bei einer Genauigkeit von 1  $\mu\text{m}$  in der Translation und  $0,0001^\circ$  in der Rotation. Diese kompakte Verstelleinheit maximiert den Probenraum auf ein Volumen von 150 mm  $\times$  150 mm  $\times$  90 mm. Damit kann ein breites Spektrum unterschiedlich geformter Proben auf Eigenspannungen hin untersucht werden.

Der Einbau der verpackten Chips erfolgt unter Observation im Direktstrahl mit Hilfe einer CCD- Kamera. So wird sichergestellt, dass die Chipoberfläche im Drehzentrum der Diffraktometerkreise justiert ist.

Das gesamte Experiment befindet sich in einer Strahlenschutzkabine.

## 4.4 Justage des Diffraktometers

Nur ein korrekt justiertes Diffraktometer liefert präzise und quantifizierbare Ergebnisse. Dazu muss in erster Linie sichergestellt sein, dass sich die Drehachsen der Diffraktometerkreise in einem Punkt schneiden.

Der Aufbau, der zum Ausrichten der Achsen verwendet wurde, ist in Abbildung 4-9 gezeigt. An den Einbauort der Probe wird ein  $90^\circ$ -Prüfkörper gesetzt und dessen Stirnfläche mit Hilfe eines Autokollimators parallel zu dem vertikal stehenden  $\chi$ -Kreis orientiert.

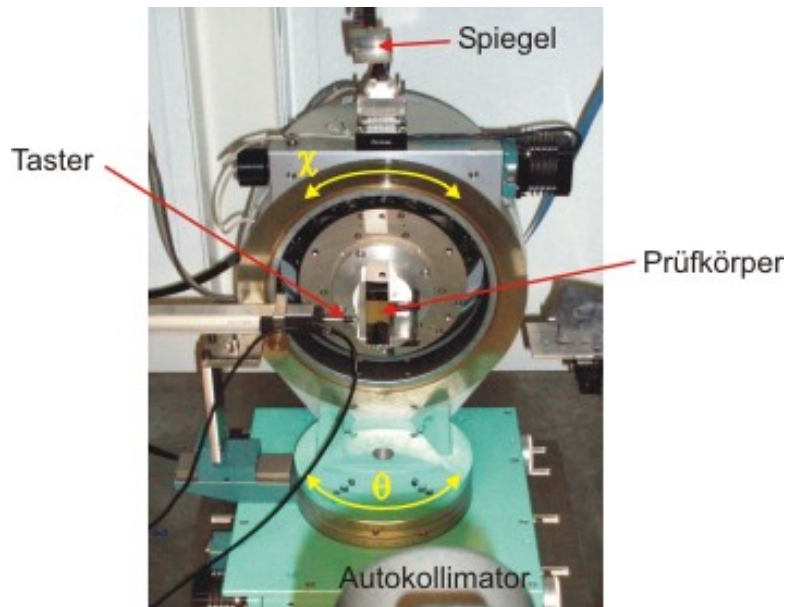


Abb.4-9: Anordnung zur Justage des Diffraktometers ( $\chi=0^\circ$ ,  $\theta=0^\circ$ )

Anschließend wird das Autokollimationsfernrohr über einen Umlenkspiegel auf die Oberseite des Prüfkörpers gerichtet. Unter Beobachtung im Autokollimator ist es dann möglich, den  $\chi$ -Kreis über vier Stellschrauben senkrecht zur Braggwinkelachse  $\theta$  zu justieren. Sobald die Drehachsen der Kreise  $\chi$  und  $\theta$  in einem Winkel von  $90^\circ$  zueinander ausgerichtet sind, muss geprüft werden, ob sich auch die Drehzentren in einem Punkt schneiden. Dazu wird ein induktiver Taster seitlich an den Prüfkörper angesetzt. Wird zwischen den Diffraktometerstellungen  $\chi=0^\circ$ ,  $\theta=0^\circ$  und  $\chi=180^\circ$ ,  $\theta=180^\circ$  keine Wegdifferenz gemessen, dann stimmen die Drehzentren überein. Dieses Ziel wurde bis auf  $5\,\mu\text{m} \pm 1\,\mu\text{m}$  erreicht.

Der gemessene Taumelfehler der Diffraktometerachsen  $\chi$  und  $\theta$  ist in Abbildungen 4-10 grafisch aufgearbeitet. Der  $\chi$ -Kreis taumelt um weniger als  $\pm 13$  Winkelsekunden um seine Drehachse. Die Anordnung des Diffraktometers im Messaufbau erlaubt keine vollständige Umdrehung der  $\theta$ -Achse. Die beobachtete Taumelbewegung zwischen  $0^\circ$  und  $270^\circ$  kann jedoch gut mit einer Sinusfunktion angepasst werden, so dass sich der fehlende Quadrant extrapolieren lässt. Der Taumelfehler des  $\theta$ -Kreises ist kleiner als  $\pm 10$  Winkelsekunden. Der Beitrag zur Unsicherheit der Braggwinkelmessung durch das Taumeln ist mit weniger als  $2 \cdot 10^{-6}$  Winkelsekunden vernachlässigbar.

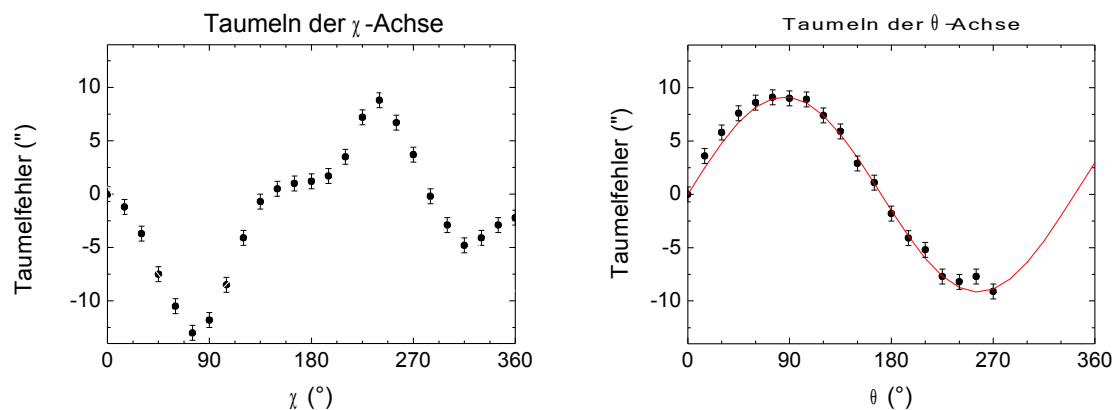


Abb.4-10: Taumelfehler der Diffraktometerkreise  $\chi$  und  $\theta$

## 4.5 Temperaturstabilisierung

Bei der Inbetriebnahme des Experiments ist aufgefallen, dass sich die gemessenen Bragg-Reflexe mit der Zeit systematisch zu kleineren Winkeln verschieben.

Um diese Drift zu quantifizieren, wurde an einem geätzten unverspannten Siliziumkristall der symmetrische (0 0 8)-Reflex in Abständen von zehn Minuten wiederholt über einen Zeitraum von zwei Stunden aufgenommen. Abbildung 4-11 zeigt, dass die Verschiebung des Messsignals in erster Näherung linear verläuft und etwa  $0,003^\circ$  pro Stunde beträgt.

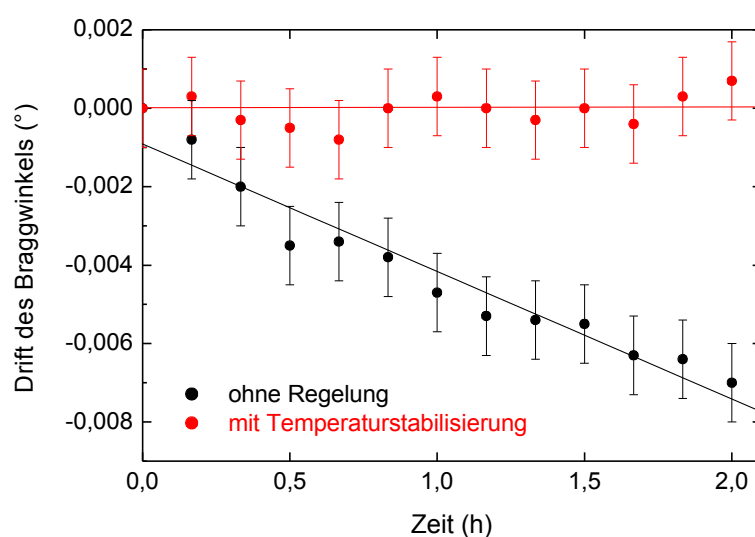


Abbildung 4-11: Drift des wiederholt gemessenen Braggreflexes (0 0 8), ohne (schwarz) und mit (rot) Temperaturregelung

Die Vermutung, ein Temperaturanstieg in der Apparatur wäre Ursache für diese systematische Drift der Braggreflexe, konnte durch eine Temperaturmessung bestätigt werden. Über den Zeitraum von neun Stunden ist an drei verschiedenen Stellen des Messaufbaus der Verlauf der Temperatur aufgezeichnet worden: 1. an einem Schrittmotor, 2. am Experimenttisch und 3. mitten im Raum der Strahlenschutzkabine.

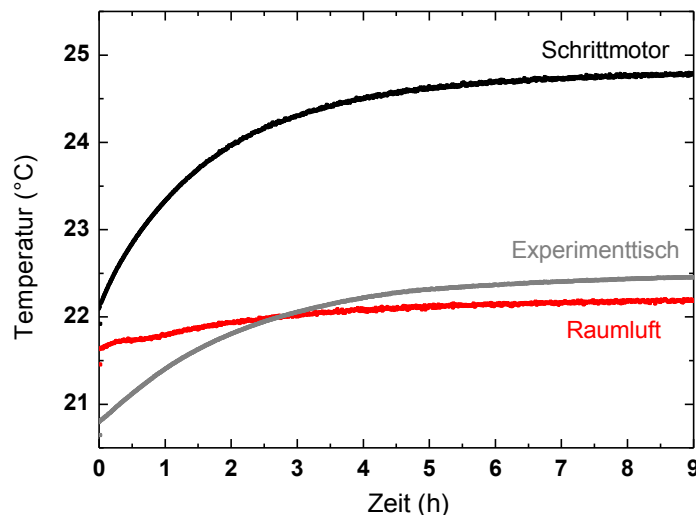


Abbildung 4-12: unstabiler Temperaturverlauf innerhalb der Messapparatur

Die Messung zeigt einen deutlichen Temperaturanstieg von über 2,5 °C in der Nähe des Schrittmotors, der sich mit leichter Verzögerung auch auf den Experimenttisch auswirkt. Die Raumtemperatur hat sich während der Messung um 0,5 °C erhöht. Innerhalb der ersten zwei Stunden ist der Temperaturanstieg am größten. Er beträgt fast 2 °C am Motor und etwa 1 °C am Tisch, was laut Abbildung 4-11 zum Driften des gemessenen Braggwinkels um 0,6° führt. Im Umkehrschluss muss demnach die Temperatur am Schrittmotor bis auf  $\pm 0,34$  °C und am Experimenttisch bis auf  $\pm 0,17$  °C stabilisiert sein, um den Braggwinkel innerhalb von  $\pm 0,001^\circ$  reproduzierbar messen zu können. Nach sieben Stunden scheinen diese Bedingungen erfüllt zu sein. Allerdings befand sich die Motorsteuerung des Diffraktometers während der in Abbildung 4-12 dargestellten Aufzeichnung im Standby-Modus, d.h. an den Motoren liegt ein konstanter Haltestrom an. Im Verlauf einer realen Spannungsmessung werden die Kreise des Diffraktometers jedoch unregelmäßig verfahren. Die Motoren müssen also geregelt gekühlt werden. Die dazu eingesetzte aktive Wasserkühlung ermöglicht an dieser Stelle auch bei ungleichmäßigem Diffraktometerbetrieb eine Temperaturstabilisierung auf  $\pm 0,2$  °C. Weitere Wärmequellen, wie die Röntgenanode und die Turbopumpen sind ebenfalls in den Kühlkreislauf



integriert worden. Die Zuluft der Laborklimatisierung wird zum Teil direkt in die Strahlenschutzkabine geleitet, so dass über einen Temperatursensor in dem Zuluftsystem die Raumluft in der Strahlenschutzkabine geregelt und innerhalb von  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  stabilisiert werden kann. Diese Maßnahmen garantieren während der gesamten siebenstündigen Spannungsanalyse eine Temperaturstabilität von  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  am Experimenttisch und damit eine Reproduzierbarkeit der Braggwinkelmessung innerhalb der geforderten Unsicherheit von  $\pm 0,001^{\circ}$  (siehe Abbildung 4-11).

## 4.6 Messtechnik und Signalauswertung

Das Intervall von zulässigen Braggwinkeln ist durch die spezielle Probengeometrie der verpackten Chips stark eingeschränkt. Zwischen  $30^{\circ}$  und  $75^{\circ}$  stehen der Messung mit Molybdänstrahlung in Silizium lediglich rund 40 erlaubte Reflexe zu Verfügung. Eine hinreichend genaue Bestimmung des vollständigen Dehnungstensors wird mit der Analyse der Braggreflexion von 25 Netzebenen der Probe erreicht. In der Praxis haben sich folgende Reflexe mit ihren drei weiteren jeweils um  $\phi=90^{\circ}$  gedrehten Richtungen als besonders geeignet herausgestellt:

h	k	l	$\theta (K_{\alpha 1})$	$\psi$	Darwin-Breite
0	0	12	$51,594^{\circ}$	$0^{\circ}$	0,14"
1	3	11	$48,367^{\circ}$	$16,039^{\circ}$	0,11"
0	4	12	$55,692^{\circ}$	$18,435^{\circ}$	0,13"
4	4	12	$60,035^{\circ}$	$25,239^{\circ}$	0,12"
2	6	12	$62,351^{\circ}$	$27,791^{\circ}$	0,12"
0	8	12	$70,357^{\circ}$	$33,690^{\circ}$	0,14"
3	9	11	$71,545^{\circ}$	$40,776^{\circ}$	0,10"

Tabelle 4-1: Standardsatz an geeigneten Reflexen für die Spannungsanalyse von verpackten Chips

Die Auswahl erfolgte nach den Kriterien möglichst hohe Intensität und möglichst hohe Asymmetrie. Während symmetrische Reflexe nur Auskunft über die Dehnung senkrecht zur Chipoberfläche geben, liefern asymmetrische Reflexe wichtige Dehnungsanteile in der Chipebene.

Der Ablauf einer Spannungsmessung gliedert sich in folgende Schritte:

Zunächst muss gewährleistet sein, dass die Normalen der zur Reflexion gebrachten Netzebenen in der Beugungsebene liegen. Die Orientierung erfolgt anhand des symmetrischen (0 0 12)-Reflexes mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,001^{\circ}$ .

Nach der Orientierung wird der Braggwinkel des (0 0 12)-Reflexes nach der so genannten Bond-Methode [29] absolut gemessen. Dabei wird ein und derselbe Reflex zweimal durch Invertieren des Strahlengangs abgetastet. Dies hat zur



Folge, dass mögliche Offset-Fehler in der Winkelmessung eliminiert werden. Die Röntgenstrahlung trifft auf die drehbar gelagerte Probe und wird, wie in Abbildung 4-13 gezeichnet, je nach Kristallstellung nach rechts ( $\theta_R$ ) oder nach links ( $\theta_L$ ) reflektiert.

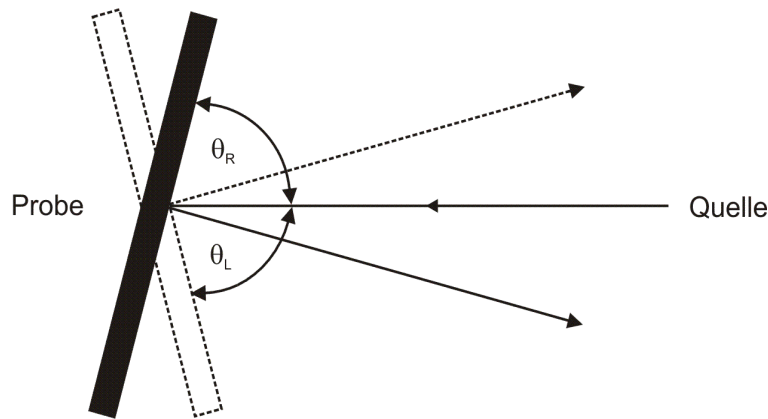


Abbildung 4-13: Messung des Braggwinkels nach Bond

Der Braggwinkel  $\theta_B$  lässt sich aus den Drehwinkeln des Kristall wie folgt berechnen:

$$\theta_B = 90^\circ - \frac{\theta_R - \theta_L}{2} \quad (16)$$

Repräsentativ seien hier die entsprechenden Rockingkurven des (0 0 12)-Reflex eines Thermoplast umspritzten Chips gezeigt.

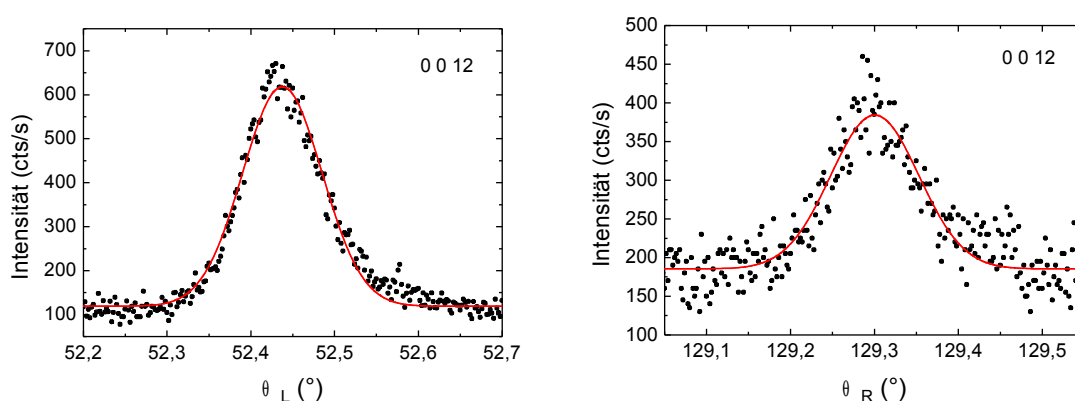


Abbildung 4-14:  $\theta$ -Scan des (0 0 12)-Reflexes nach der Bond-Methode

Das gemessene Reflexprofil kann als Faltung der intrinsischen Reflexionskurve des Siliziumkristalls (Darwin-Breite:  $0,00004^\circ$ , vgl. Tabelle 4-1) mit der natürlichen spektralen Linienform der Molybdänstrahlung ( $0,025^\circ$  [30]) und der Divergenz des Primärstrahls ( $0,1^\circ$ , vgl. Abbildung 4-3) aufgefasst werden. Dem dominierenden

Einfluss der Strahldivergenz entsprechend beträgt die Breite der Rockingkurven  $0,1^\circ$ . An die gemessenen Intensitäten wurde eine Gaußfunktion angepasst. Die Maxima liegen in diesem Fall bei  $\theta_L = 52,438^\circ \pm 0,001^\circ$  bzw.  $\theta_R = 129,300^\circ \pm 0,001^\circ$ . Daraus folgt ein Bragg-Winkel von  $\theta_B = 51,569^\circ \pm 0,001^\circ$ , der gegenüber dem von unverspannten Silizium um  $-0,025^\circ \pm 0,001^\circ$  verschoben ist. Dieser Wert entspricht nach Gleichung (10) einer absoluten Dehnung von  $3,5 \cdot 10^{-4} \pm 0,2 \cdot 10^{-4}$ .

Ein Nachteil der Bond-Methode ist, dass zwei Detektoren benötigt werden, da das Umschwenken eines Detektors von der einen zur anderen Seite sehr umständlich ist. Deswegen wird dieses Verfahren nur auf den (0 0 12)-Reflex angewandt mit einer festgelegten Positionierung des zweiten Photomultipliers.

Die Dehnungen der 24 weiteren ausgewählten Kristallrichtungen werden über eine Messung des Differenzwinkels der K-alpha-Linien mit der K-beta-Linie ermittelt [31]. Durch Subtraktion der entsprechenden Bragg-Gleichungen (9) ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen der Winkeldifferenz und dem Gitterparameter d:

$$\theta_\alpha - \theta_\beta = \arcsin\left(\frac{\lambda_\alpha}{2d}\right) - \arcsin\left(\frac{\lambda_\beta}{2d}\right) \quad (17)$$

Die Messung von einem Braggreflex beinhaltet sechs  $\theta$ -Scans:  $K_\beta$ ,  $K_{\alpha 1}$ ,  $K_{\alpha 2}$  jeweils in Vorwärts- und in Rückwärtsrichtung. Aus diesen Messwerten werden die Differenzen  $\theta_{\alpha 1} - \theta_\beta$  und  $\theta_{\alpha 2} - \theta_\beta$  nach der Kreuzkorrelationsmethode [32] bestimmt. Es ergeben sich also pro Reflex vier Werte für den Netzebenenabstand, über die gemittelt wird. Die Messzeit pro Netzebene beträgt aufgrund der schwachen Intensität ( $\sim 500$  Photonen pro Sekunde) etwa 15 Minuten. Die Wellenlängen der Alpha-Linien  $\lambda_{\alpha 1} = 7,0931717 \cdot 10^{-11} \text{ m}$  bzw.  $\lambda_{\alpha 2} = 7,1360722 \cdot 10^{-11} \text{ m}$  sind der Literatur entnommen [33]. Das Linien-Dublett  $K_{\alpha 1}$  und  $K_{\alpha 2}$  hängt unmittelbar mit der Feinstruktur der L-Schale und damit der Spin-Bahn-Kopplung der Elektronen in Molybdän zusammen. Für die betrachteten Braggwinkel beträgt diese Aufspaltung  $0,39^\circ$  bis  $1,07^\circ$ . Die Aufspaltung der  $K_\beta$ -Linie, hervorgerufen durch die Feinstruktur der M-Schale, kann mit diesem Diffraktometer nicht beobachtet werden, da das Auflösungsvermögen durch die Divergenz des Primärstrahls von  $0,1^\circ$  limitiert ist. Die Wellenlänge der Beta-Strahlung  $\lambda_\beta$ , die hier einen Mittelwert aus den zwei Wellenlängen  $\lambda_{\beta 1}$  und  $\lambda_{\beta 2}$  darstellt, muss deswegen speziell für diesen Messaufbau kalibriert werden. Sie wird vor jeder Spannungsanalyse neu repräsentativ für den (0 0 12)-Reflex aus der absoluten Messung des Gitterparameters nach der Bond-Methode mit einer Unsicherheit von  $\pm 0,0002 \cdot 10^{-11} \text{ m}$  bestimmt. Der wesentliche Vorteil der Braggwinkelmessung mit mehreren Wellenlängen im Gegensatz zur Bond-Methode ist der, dass zwischen den Aufnahmen der drei Linien  $K_\beta$ ,  $K_{\alpha 1}$  und  $K_{\alpha 2}$  die Achsen des Diffraktometers nur um wenige Grad ( $< 15^\circ$ ) verfahren werden müssen. Dadurch werden Messfehler

durch eine inkorrekte Positionierung der Probe im Diffraktometer minimiert [34]. Eine Fehljustage führt bei den  $K_\alpha$  - und der  $K_\beta$ -Linie zu einer Winkelverschiebung in dieselbe Richtung. In das Messergebnis  $\theta_\alpha - \theta_\beta$  geht deswegen nicht der absolute Fehler der Winkelmessung ein, sondern nur die Differenz der Messfehler bei der Bestimmung der beiden Winkelpositionen. Auch die Umkehrspanne der Braggwinkelachse von  $0,003^\circ$  hat keinen Einfluss auf die Differenzwinkelmessung. Nach sieben Stunden Messzeit werden aus den Dehnungen der insgesamt 25 aufgenommenen Netzebenen der dreidimensionale Dehnungs- und schließlich der Spannungstensor berechnet.

## 4.7 Validierung des Aufbaus

Die Validierung des Mikrodiffraktometers findet anhand von definiert verspannten Siliziumplättchen statt. Dazu werden Stückchen von Siliziumwafern an den Seiten auf ein U-Profil aus Aluminium geklebt. Mit Hilfe einer Schraube wird eine flache konvexe Glaslinse von hinten gegen das Plättchen gedrückt. Die Verbiegung des Silizium erfolgt definiert unter Beobachtung mit einem induktiven Taster.

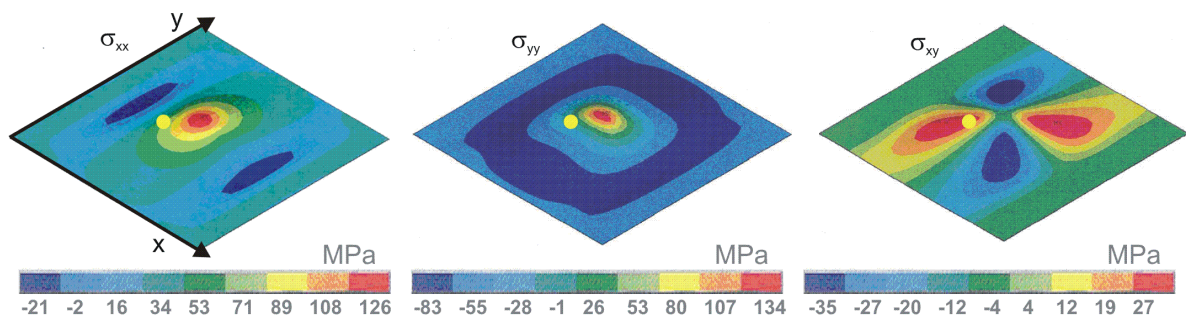


Abbildung 4-15: Spannungsverteilung der Komponenten  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  und  $\sigma_{xy}$  in einem gebogenen Siliziumwafer (Größe:  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 600 \mu\text{m}$ , Verbiegung:  $50 \mu\text{m}$  im Mittelpunkt)

ANSYS-Simulationen zeigen, dass bei  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 600 \mu\text{m}$  großen Wafern, die im Mittelpunkt um  $50 \mu\text{m}$  nach vorne gebogen sind, hauptsächlich Spannungen in den Tensorkomponenten  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  und  $\sigma_{xy}$  auftreten, und zwar mit den in Abbildung 4-15 aufgetragenen Spannungsverteilungen.

Die gewählte Messstelle liegt um  $4 \text{ mm}$  in x-Richtung und um  $4 \text{ mm}$  in y-Richtung aus dem Zentrum heraus versetzt. Dort sind folgende Spannungswerte zu erwarten:  $\sigma_{xx}=34 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{yy}=26 \text{ MPa}$  und  $\sigma_{xy}=27 \text{ MPa}$ .

Die Röntgenbeugungsanalyse liefert den folgenden Spannungstensor:

$$\sigma = \begin{pmatrix} 29 & 27 & -4 \\ -29 & 27 & -3 \\ 1 & 5 & -12 \end{pmatrix} \text{ MPa}$$

Innerhalb von  $\pm 5$  MPa stimmt das Messergebnis mit der Simulation überein.

Um die Aussagekraft des gemessenen Spannungstensors einzuschätzen, werden die in das Messergebnis einfließenden Unsicherheiten im Detail betrachtet.

Die Genauigkeit der absoluten Winkelmessung des (0 0 12)-Braggreflexes hängt unmittelbar mit der statistischen Unsicherheit der gemessenen Peakpositionen zusammen. Über die Reproduzierbarkeit der Rockingkurven wird das Intervall für diese Unsicherheit mit  $\pm 0,001^\circ$  abgeschätzt (vgl. Abbildung 4-11). Mögliche Dejustagen von Diffraktometer und Probe, die zu systematischen Abweichungen führen könnten, sind minimal. Eine exzentrische Verschiebung der Probe aus dem Drehzentrum des Diffraktometers ändert zwar die Richtung der reflektierten Röntgenstrahlung, die gemessenen Stellungen der Braggwinkelachse  $\theta_R$  bzw.  $\theta_L$  werden dadurch aber nicht beeinflusst. Die Unsicherheit der Kristallorientierung von  $\pm 0,001^\circ$ , das Taumeln der Diffraktometerachsen innerhalb von  $\pm 0,004^\circ$  (vgl. Abbildung 4-10) und ein eventuell schief einfallender Röntgenstrahl mit einer maximalen Schrägstellung von  $\pm 0,2^\circ$  stellen Kosinusfehler in Bezug auf die Braggwinkelmessung dar. Der Beitrag durch diese systematischen Fehler zur Messunsicherheit ist mit insgesamt weniger als  $\pm 0,00001^\circ$  vernachlässigbar. Sind die Peakpositionen  $\theta_R$  und  $\theta_L$  bis auf  $\pm 0,001^\circ$  bekannt, dann ergibt sich auch für den absoluten Braggwinkel des (0 0 12)-Reflexes eine maximale Unsicherheit von  $\pm 0,001^\circ$ . Diese wirkt sich nach Gleichung (10) in der Dehnung mit einer Abweichung  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$  aus. Die Toleranz der daraus abgeleiteten Wellenlänge für die Molybdän- $K_\beta$ -Strahlung beträgt  $\pm 0,0002 \cdot 10^{-11}$  m.

Zur Bewertung der Dehnungsmessung aus der Winkeldifferenz  $\delta = \theta_\alpha - \theta_\beta$  wird Gleichung (17) zunächst nach d aufgelöst

$$d = \frac{1}{\sin \delta} \cdot \sqrt{\left(\frac{\lambda_\alpha}{2}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_\beta}{2}\right)^2 - \frac{\lambda_\alpha \lambda_\beta}{2} \cos \delta} \quad (18)$$

und anschließend nach  $\delta$  abgeleitet.

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{1}{\sin \delta} \cdot \left( \frac{\lambda_\alpha \lambda_\beta}{4d^2} + \cos \delta \right) \cdot \Delta \delta \quad (19)$$

Die Genauigkeit des so erhaltenen Gitterparameters  $d$  hängt also nicht nur von der Unsicherheit der gemessenen Winkeldifferenz  $\Delta\delta$  ab, sondern auch von deren Betrag  $\delta$ . Deswegen wird nicht der Abstand zwischen den beiden  $K_\alpha$ -Linien betrachtet, sondern nur die jeweilige Winkeldifferenz zur  $K_\beta$ -Linie.

Ausgehend von Gleichung (18) wird eine Modellrechnung nach GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) durchgeführt. Abbildung 4-16 zeigt am Beispiel des (4 4 12)-Reflexes mit einem Differenzwinkel  $\delta$  von etwa  $9,45^\circ$  das mit GUM berechnete Unsicherheitsbudget.

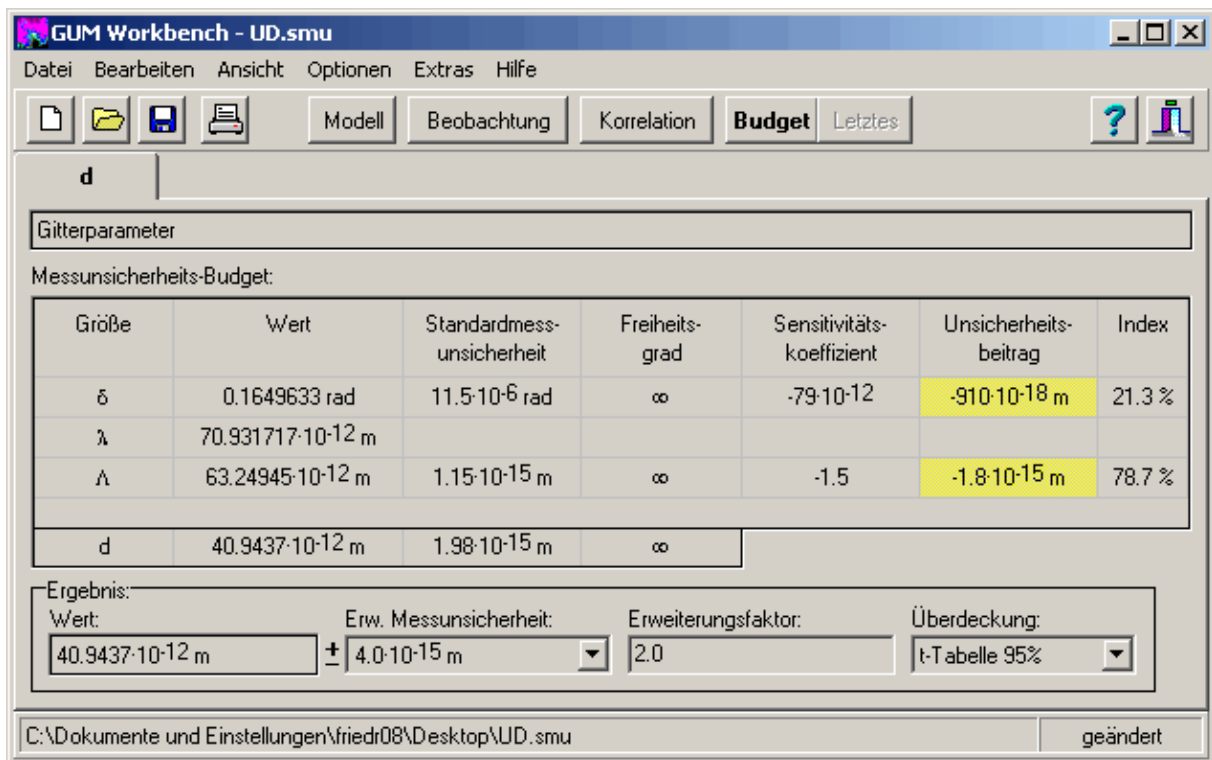


Abbildung 4-16: Unsicherheitsbudget des Gitterparameters nach GUM bei der Differenzwinkelmessung am Beispiel des (4 4 12)-Reflexes

Die Messunsicherheit des Gitterparameters  $d$  beträgt  $\pm 4 \cdot 10^{-15}$  m. Sie setzt sich zu 21,3 % aus der aus Wiederholungsmessungen abgeschätzten Unsicherheit der Winkeldifferenz  $\delta$  von  $\pm 0,001^\circ$  und zu 78,7 % aus der Unsicherheit bei der Bestimmung der Molybdän- $K_\beta$ -Wellenlänge (in Abbildung 4-16 mit  $\Lambda$  bezeichnet) von  $\pm 0,0002 \cdot 10^{-11}$  m zusammen. Eine weitere konstruktive Verbesserung des bestehenden Spannungsdiffraktometers wäre daher durch die Verwendung einer Röntgenanode aus einer Molybdän-Legierung mit z. B. einem Silberanteil denkbar. Dann könnten ausschließlich die  $K_\alpha$ -Linien von Molybdän bzw. Silber für die Differenzwinkelmessung eingesetzt werden. Die Kalibrierung der intensitätsschwächeren Molybdän- $K_\beta$ -Linie über das Bond-Verfahren, die an dieser Stelle den größten Beitrag zur Unsicherheit liefert, könnte dann entfallen. Die

Unsicherheit für die Dehnung in Messrichtung  $\Delta d/d$  beträgt  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$  für den (4 4 12)-Reflex. Für die weiteren betrachteten Netzebenen ergibt sich je nach Linienaufspaltung eine Unsicherheit der Dehnung von  $\pm 0,5 \cdot 10^{-4}$  bis  $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ , die sich durch die Mittelung über vier Messungen (jeweils  $\theta_{\alpha 1} - \theta_{\beta}$  und  $\theta_{\alpha 2} - \theta_{\beta}$  in Vorwärts- und in Rückwärtsrichtung) auf  $\pm 0,3 \cdot 10^{-4}$  bis  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$  reduziert. Für große Braggwinkel wurde das geforderte Auflösungsvermögen von  $\pm 0,5 \cdot 10^{-4}$  erreicht.

Aus den Dehnungsmessungen von 25 unterschiedlichen Netzebenen wird mit den Gleichungen (12) und (13) der vollständige dreidimensionale Spannungstensor berechnet. Da der funktionelle Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen und dem Spannungstensor sehr komplex ist, erfolgt die Fehleranalyse des Endergebnisses an dieser Stelle numerisch. Dazu werden die eingehenden Dehnungen in Messrichtung innerhalb der nach GUM abgeschätzten Unsicherheit von maximal  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$  variiert und ihre Auswirkung auf den Spannungstensor beobachtet. Mit dieser Methode wurde eine Messunsicherheit der resultierenden Spannungskomponenten von  $\pm 10$  MPa festgestellt.

Innerhalb von  $\pm 10$  MPa stimmt auch die Spannungsmessung des gezielt verspannten Siliziumplättchens mit den berechneten Werten überein.

# Ergebnisse der Spannungsmessung

---

Mit der röntgendiffraktometrischen Spannungsanalyse an verpackten Sensoren werden in dieser Arbeit neue Wege beschritten. Vorgestellt werden Spannungszustände induziert durch das SM8-Gehäuse für die Oberflächenmontage, sowie durch die Duroplast Primärverpackung und die Thermoplast Sekundärverpackung, wie sie zur Verkapselung von Raddrehzahlsensoren angewandt werden. Die Ergebnisse der Röntgenbeugung, der piezoresistiven Kraftsensorik und entsprechende Simulationen werden miteinander verglichen und bewertet.

## 5.1 Mechanische Spannungen im SM8-Gehäuse für die Oberflächenmontage

Die Oberflächenmontagetechnik wurde in den 1960er Jahren von der Fa. IBM entwickelt. Inzwischen stellen elektronische Bauelemente in SMD-Bauform (Surface Mounted DeVICES) den größten Marktanteil. Der Vorteil von SMD-Gehäusen ist die rationelle Bestückungsmöglichkeit auf der Platine durch geringe Bauhöhen und eine höhere Packungsdichte.

Die Oberflächenmontage wird z.B. von der MEAS Deutschland GmbH für magnetoresistive Sensoren bevorzugt. Typische Anwendungsgebiete der magnetoresistiven Sensoren im Automobil sind Winkel- und Drehzahlmessungen. Sie werden zur Ermittlung des Lenkwinkels (siehe Kapitel 2.1) und der Kurbelwellenstellung, als auch für die Erfassung der Motordrehzahl eingesetzt.

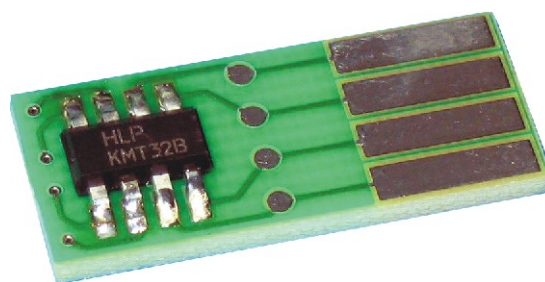


Abb.5-1: Kraftmesschip im SM8-Gehäuse für die Oberflächenmontage

Das SM8-Gehäuse hat eine längliche Form mit acht Anschlusspins in zwei Reihen an gegenüberliegenden Seiten. Mittig verkapselt ist ein Kraftmesschip der Größe  $1,1\text{ mm} \times 1,2\text{ mm}$  mit insgesamt 12 elektrisch auslesbaren Messzellen (siehe Abbildung 3-2).

Der Chip wird im aufgelöteten Zustand röntgenographisch untersucht. Zur Vermeidung von Randeffekten wurde ein Messbereich von  $0,7\text{ mm} \times 0,7\text{ mm}$  gewählt, der sich symmetrisch um den Chipmittelpunkt herum erstreckt. Der räumliche Fokus des direkten Röntgenstrahls beträgt  $160\text{ }\mu\text{m}$ , so dass eine gleichmäßige Verteilung von höchstens neun Messpunkten auf dieser Fläche sinnvoll ist. Zur Bestimmung des dreidimensionalen Spannungstensors an einem Ort der Chipoberfläche werden die Winkel der Braggreflexion von 25 unabhängigen Netzebenen analysiert. Die abgeschätzte Messunsicherheit beträgt  $\pm 10\text{ MPa}$ .

Die piezoresistive Kraftmessung liefert die Normalspannungsdifferenzen der Komponenten  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$ , in der Chipebene, die im folgenden Diagramm 5-2 der Röntgenbeugungsanalyse gegenübergestellt sind. Der im Spannungsverlauf der elektrischen Messung grau abgeschattete Rand wird von der röntgenographischen Messung nicht betrachtet.

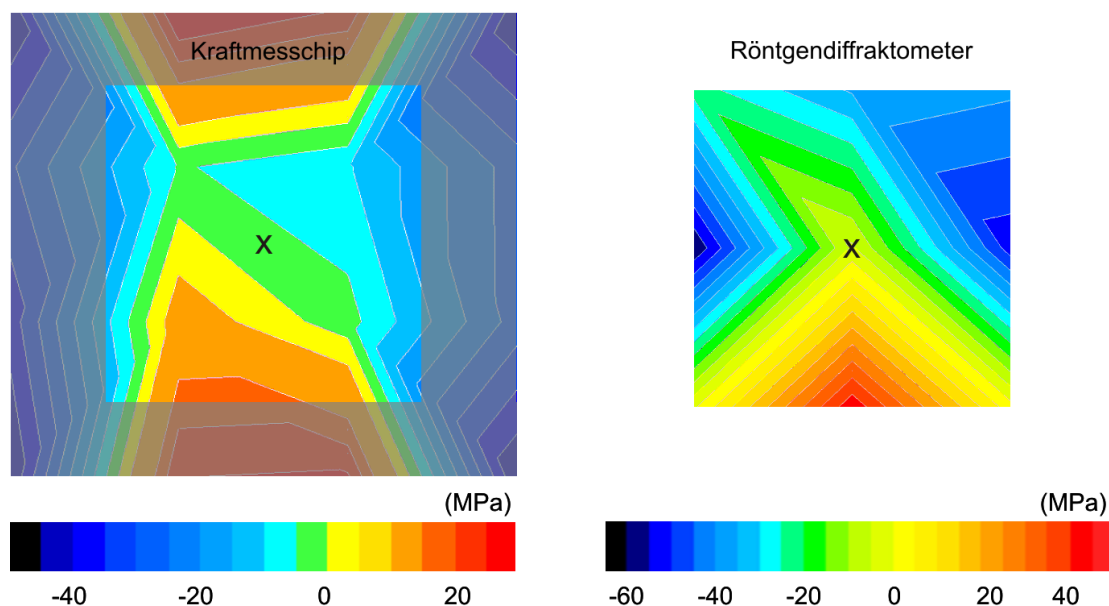


Abb.5-2: Normalspannungsdifferenz  $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$  infolge der SM8-Verkapselung  
rechts: piezoresistive Messung, 12 Messpunkte (Quelle: MEAS Deutschland GmbH), links: Röntgenbeugungsanalyse, 9 Messpunkte

Die Resultate beider Methoden zeigen ähnliche Spannungsverläufe, obwohl sich diese nur auf wenige Messpunkte stützen. Im Zentrum des Chips (siehe Markierung in Abbildung 5-2) ist die Differenz der Normalspannungskomponenten  $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$  gleich null, d.h. die Belastungen in x- und in y-Richtung sind gleich groß. Der Kraftmesschip ergibt entlang der Gehäuseseiten, an denen sich die



elektrischen Kontakte befinden, eine positive Normalspannungsdifferenz von ungefähr 20 MPa und quer dazu eine negative von -20 MPa. Auch die Röntgenbeugungsanalyse zeigt an den Rändern links und rechts negative Spannungsdifferenzen. Positive Werte treten zwar an der unteren Gehäusesseite auf, jedoch nicht wie in der elektrischen Messung auch an der oberen. Eventuell hat eine Dejustage der Probenmitte von 100  $\mu\text{m}$  in vertikaler Richtung aus dem Diffraktometerzentrum zu diesem leicht abweichenden Verlauf geführt. Die absoluten Werte der röntgenographisch detektierten Normalspannungsdifferenz, die sich über einen Bereich von -50 MPa bis 40 MPa erstrecken, sind angesichts der relativ großen Messunsicherheit von  $\pm 10$  MPa durchaus mit der elektrischen Messung vergleichbar.

## 5.2 Spannungszustand im Duroplast-PSSO4-Gehäuse

Im PSSO4-Gehäuse, der Primärverpackung für Raddrehzahlsensoren, wurden substituierend piezoresistive Kraftmesschips mit einer Oberfläche von 2,8 mm  $\times$  1,7 mm verkapselt. Sie umfassen 60 Messzellen verteilt auf sechs Reihen und zehn Spalten, von denen jede zweite elektrisch ausgelesen wird.

Die Röntgenbeugungsanalyse findet orts aufgelöst nur an insgesamt 15 Stellen statt, da die Prozedur der Winkelmessung mit sieben Stunden pro Messpunkt sehr zeitaufwendig ist. Diese 15 Stützstellen sind mit einem Rasterabstand von 550  $\mu\text{m}$  in drei Reihen gleichmäßig um den Chipmittelpunkt angeordnet, so dass die röntgenographische Messung einen Bereich von 2,2 mm  $\times$  1,1 mm abdeckt. Bei einem einfallenden Röntgenstrahl mit einer Halbwertsbreite von 160  $\mu\text{m}$  ist so sichergestellt, dass Randeffekte vermieden werden. Mit der Analyse von 25 verschiedenen Reflexen, wird eine Messunsicherheit von etwa  $\pm 10$  MPa erreicht.

Für ein umfassendes Verständnis des Belastungszustands der Chips ist die Kenntnis der einzelnen Spannungskomponenten erforderlich. In Abbildung 5-3 sind die mechanischen Spannungen einer primärverpackten Probe deswegen für alle sechs Komponenten des Spannungstensors im Einzelnen aufgetragen. Die drei Normalkomponenten  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  und  $\sigma_{zz}$  weisen ein negatives Vorzeichen auf, d.h. es liegt eine allseitige Kompression des Siliziumchips vor, die im wesentlichen während der Abkühlphase des Verpackungsprozesses durch die niedrige thermische Ausdehnungen von Silizium im Vergleich zum Kupfer-Eisen-Träger und zum Duroplast hervorgerufen wurde. Die Spannung in z-Richtung senkrecht zur Probenoberfläche verläuft weitgehend homogen mit Werten zwischen -10 MPa und -40 MPa. Signifikante Druckbelastungen treten in der Chipebene auf. In x-Richtung ist diese auf der rechten Seite mit -140 MPa besonders ausgeprägt. In y-Richtung treten Spannungen von -120 MPa an der oberen, sowie an der unteren Chipkante auf. Zusätzlich zu den Normalspannungen werden auch

Scherspannungen gemessen, besonders in der Komponente  $\sigma_{xy}$ . Extremwerte von bis zu  $-150$  MPa werden hier entlang der langen Chipkanten beobachtet. Die Scherspannungen  $\sigma_{xz}$  und  $\sigma_{yz}$  sind mit Werten zwischen  $\pm 20$  MPa vergleichsweise gering.

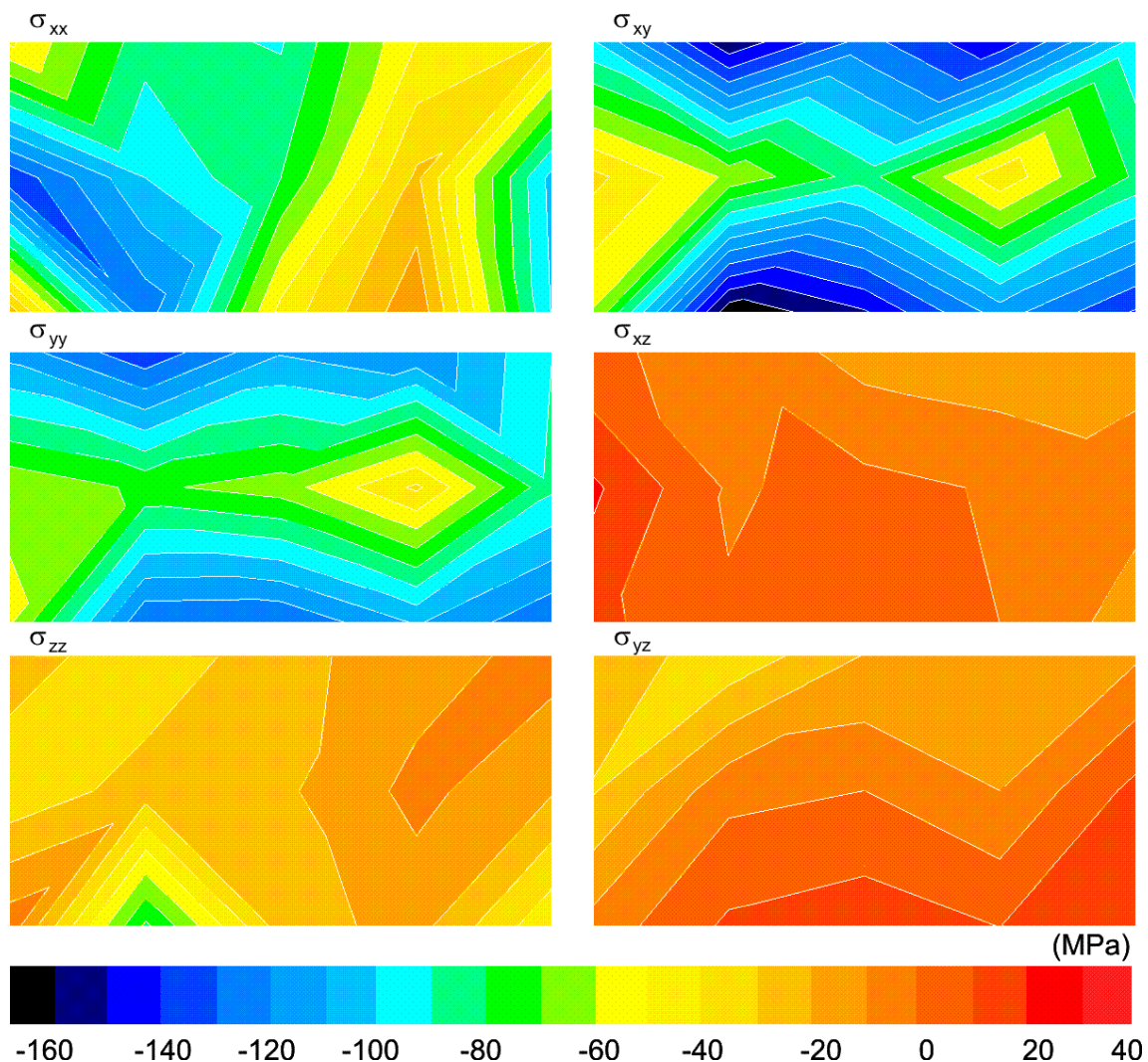


Abb.5-3: Röntgenbeugungsanalyse der Spannungskomponenten infolge der PSSO4-Verpackung (2,2 mm  $\times$  1,1 mm Scans mit  $3 \times 5$  Messwerten)

Zur besseren Vergleichbarkeit mit den Daten des Kraftmesschips sind in Abbildung 5-4 die Normalspannungsdifferenzen der Komponenten  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  aufgetragen. Der Bereich, der von der Röntgenmessung nicht erfasst wird, ist im Ergebnis der elektrischen Messung durch einen semitransparenten Rahmen abgeschattet. Beide Ergebnisse zeigen einen ähnlichen Spannungsverlauf mit einem ausgeprägten Minimum an der unteren langen Chipkante und einem Maximum an der linken kurzen Chipseite. Der Wertebereich der auftretenden absoluten Spannungen reicht bei der Röntgenbeugungsanalyse von  $-70$  MPa in der Mitte der langen Chipkanten bis hin zu  $40$  MPa im Zentrum der kurzen Chipkanten

und ist damit um den Faktor drei weiter aufgespreizt als bei der piezoresistiven Messung.

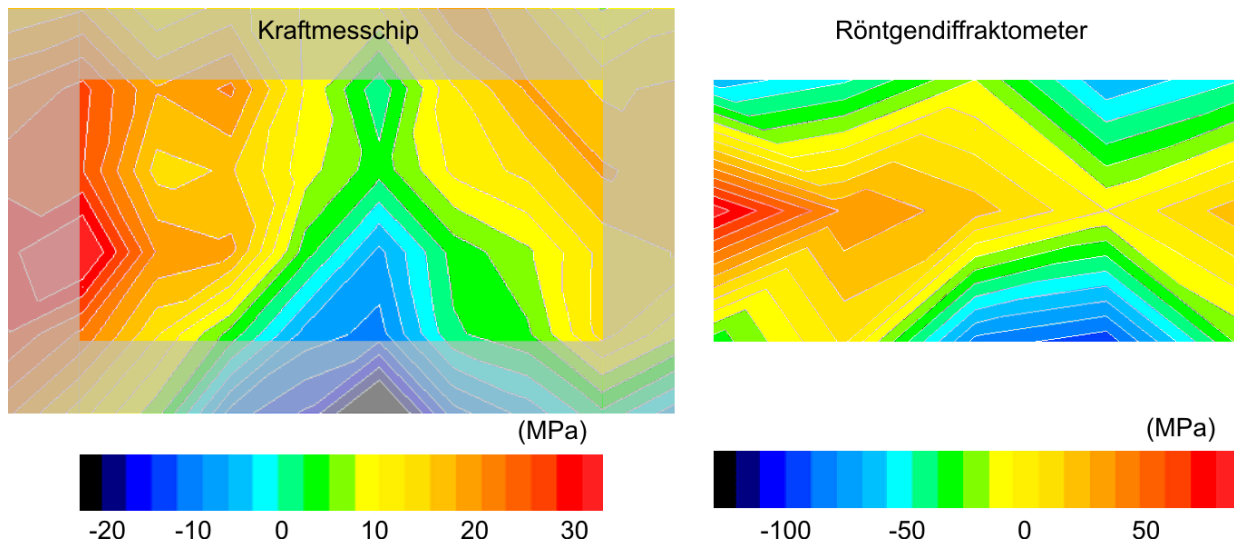


Abb.5-4: laterale Verteilung der Normalspannungsdifferenz  $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$   
links: piezoresistive Messung (Quelle: Bosch), rechts: Röntgenmessung

Die entsprechenden Simulationen wurden vom Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) durchgeführt. Abbildung 5-5 zeigt die berechnete Verteilung der Normalspannungsdifferenz infolge einer Abkühlung von 175 °C auf 20 °C während der PSSO4-Verpackung.



Abb.5-5: berechnete Differenz der Spannungskomponenten  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$   
(Quelle: IZM)

Ein quantitativer Vergleich zwischen der Simulation und der Röntgenbeugungsanalyse ist nicht möglich, da das mathematische Modell allein thermisch induzierte Spannungen berücksichtigt. Die Röntgenmessung, die den absoluten Spannungszustand des verpackten Messchips wiedergibt, kann durch zusätzliche Ursachen, wie z. B. den Schrumpf des Klebers und der Pressmasse beeinflusst werden.

Die berechnete Verteilung zeigt jedoch eine deutliche Spiegelsymmetrie bezüglich beider Chipmittellachsen, die in den gemessenen Normalspannungsdifferenzen nur ansatzweise beobachtet werden kann. Die Ergebnisse beider Messmethoden deuten darauf hin, dass der Chip bei der Verkapselung aufgrund von z.B. einer inhomogenen Kleberschicht ungleichmäßig von der Duroplast-Pressmasse umflossen wurde.

### 5.3 Spannungen durch sekundäre Spritzgussverpackung

Die im PSSO4-Gehäuse primärverpackten Kraftmesschips werden zur Fertigstellung einem weiteren Prozessschritt unterzogen, der Thermoplast-Umspritzung. Infolge der Sekundärverpackung werden Spannungen mit bis zu -200 MPa detektiert. Damit sind die sekundär verpackten Proben deutlich stärker verspannt als die primär verpackten.

In Abbildung 5-6 wird eine Röntgenbeugungsanalyse des vollständigen Spannungszustands an einem endverpackten Chip (Probennummer 80) vorgestellt. Die Darstellung ist nach den sechs einzelnen Komponenten des Spannungstensors aufgeschlüsselt. Wie bei der Charakterisierung der primärverpackten Chips erstreckt sich die orts aufgelöste Messung über einen Bereich von  $1,1\text{ mm} \times 2,2\text{ mm}$  mit  $3 \times 5$  Messstellen in einem Rastermaß von  $550\text{ }\mu\text{m}$ . Die absoluten Spannungswerte sind mit einer Messunsicherheit von  $\pm 10\text{ MPa}$  behaftet.

Die höchsten Spannungsbeträge treten auch hier in der Chipebene in den Tensorkomponenten  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  und  $\sigma_{xy}$  auf. Ein charakteristisches Ergebnis der Röntgenbeugungsanalyse ist die Spiegelsymmetrie bezüglich beider Achsen im Verlauf der Komponenten  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$  und  $\sigma_{xy}$  mit jeweils zwei ausgeprägten Minima. Die Verteilung von  $\sigma_{xx}$  ist typischerweise unsymmetrisch mit starken Verspannungen an der oberen langen Chipkante, die zur unteren Chipkante hin auslaufen.

Im folgenden werden die Normalspannung in der Chipebene zweier Thermoplast umspritzter Kraftsensoren im Detail verglichen (#80 vs. #32). Die röntgenographisch gemessene Verteilung  $\sigma_{xx}$  der Probe 80 (siehe Abbildung 5-6) zeigt ein Extremum von -140 MPa entlang der oberen langen Chipkante, welches bis zur unteren Chipkante hin auf etwa -50 MPa abflacht. In der  $\sigma_{yy}$ -Komponente werden maximale Spannungswerte von -200 MPa detektiert. Die Untersuchung eines weiteren Chips, der Probe 32 (siehe Abbildung 5-7), ergibt für die  $\sigma_{xx}$ -Komponente ebenfalls ein Minimum von -150 MPa an der oberen Chipkante. Allerdings weist die  $\sigma_{yy}$ -Komponente deutlich schwächere Druckbelastungen auf. Die absoluten Spannungswerte liegen hier bei -120 MPa.

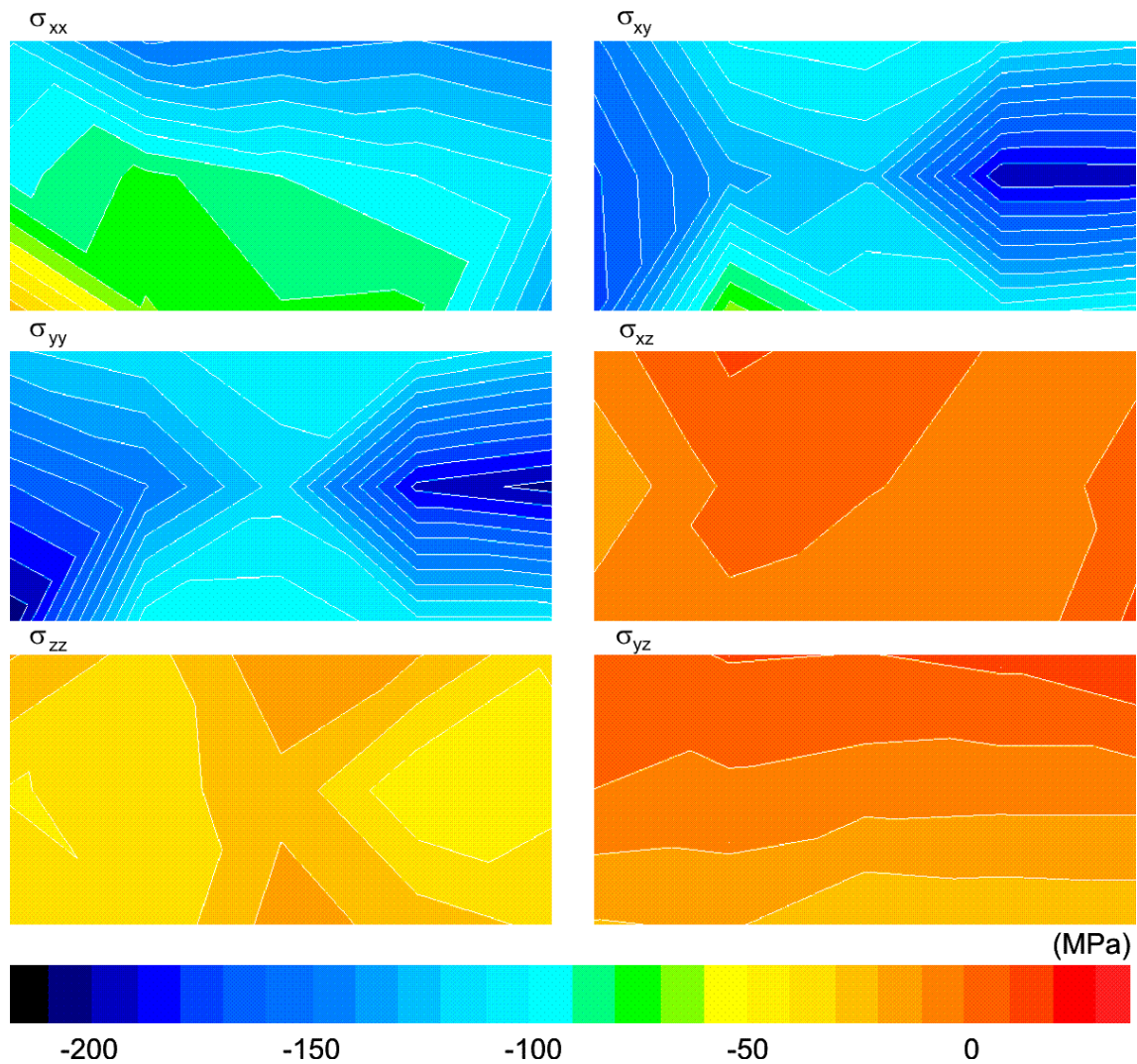


Abbildung 5-6: röntgenographisch gemessene Verteilung der sechs Spannungskomponenten an dem Chip #80 nach dem Thermoplast-Umspritzprozess (2,2 mm  $\times$  1,1 mm Scans, je 15 Messwerte)

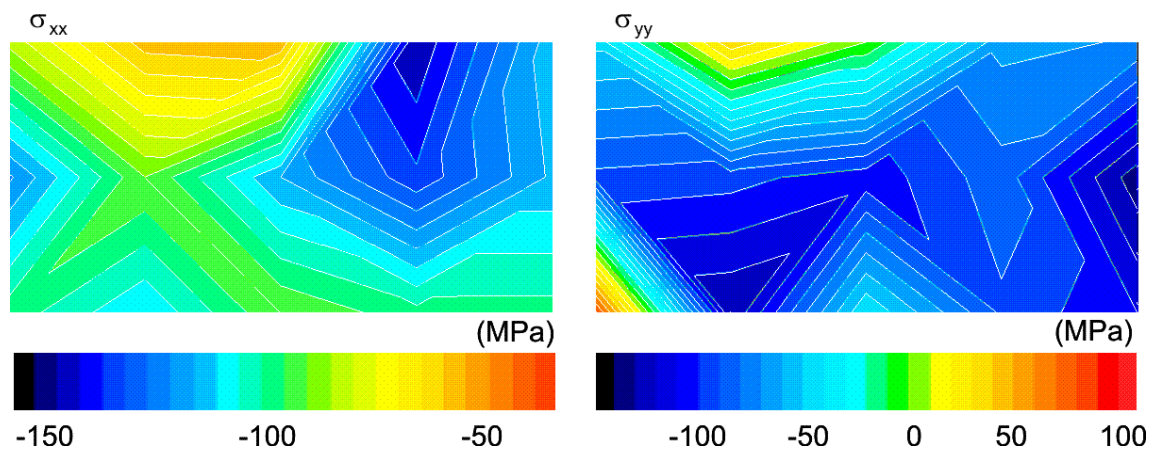


Abb.5-7: Ergebnis der Röntgenbeugungsanalyse des Thermoplast umspritzten Sensors ( # 32), Verlauf der Normalspannungen  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$



Während sich also für beide Proben in x-Richtung ähnliche Spannungen ergeben, werden in y-Richtung am Kraftmesschip 80 fast doppelt so hohe Spannungswerte gemessen, wie am Chip 32. Der Grund für diesen Unterschied liegt in der Fixierung des primärverpackten Chips in dem Halter für den sekundären Umspritzprozess. Mit zunehmender Abweichung des Winkels von ideal 90° zwischen Sensorkopf und den Anschlusspins steigt der Spannungsbetrag in der y-Komponente. Die x-Komponente hingegen bleibt von diesem Kippwinkel unbeeinflusst.

Dieses Verhalten bestätigt sich auch anhand der piezoresistiven Kraftsensorik.

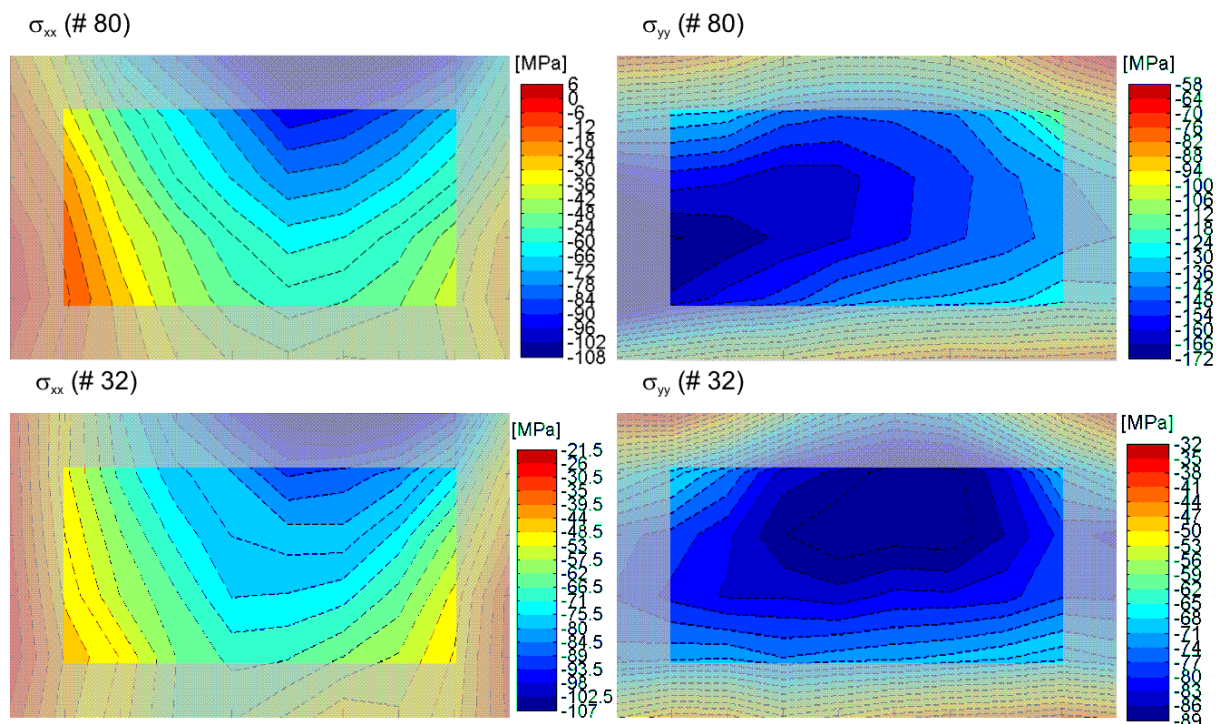


Abb.5-8: Gegenüberstellung der gemessenen Daten des Kraftmesschips, Normalkomponenten  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  von zwei sekundär verpackten Chips mit den Probennummern 32 und 80 (Quelle: Bosch)

Das Resultat der elektrischen Messung zeigt wie die Röntgenanalyse auch in der Komponente  $\sigma_{xx}$  eine maximale Druckspannung im oberen Teil der Probe. Die gemessene mechanische Spannung an dieser Stelle beträgt bei beiden Chips -110 MPa. Zur unteren Chipkante hin flacht das Extremum jeweils bis auf etwa -20 MPa ab. Die Differenz in den Spannungsbeträgen von etwa 40 MPa zwischen den beiden Messverfahren ist darauf zurückzuführen, dass die röntgenographische Methode den absoluten Spannungszustand liefert, während das elektrische Verfahren nur die zusätzliche Belastung durch den sekundären Verpackungsprozess betrachtet, aber die bereits vorhandene Eigenspannung durch die zuvor erfolgte Primärverpackung nicht berücksichtigt. Der Hub von

ungefähr 90 MPa zwischen minimaler und maximaler Spannung in der  $\sigma_{xx}$ -Verteilung spiegelt sich jedoch in allen Messergebnissen wieder. In y-Richtung weist die elektrische Messung des Kraftmesschips #32 einen mit -90 MPa homogen verspannten Bereich auf. Für den Chip #80 ergeben sich ein Spannungen von -170 MPa an der rechten Seite und -140 MPa am linken Rand. Wie bereits mittels Röntgenbeugung festgestellt, ist auch in den Resultaten der piezoresistiven Messung in y-Richtung der Chip #80 um -80 MPa stärker belastet als der Chip #32, während sich die Spannungen in x-Richtung bei beiden Proben ähnlich verhalten. Beide Messmethoden ergeben also für die Spannungskomponenten  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung.

Auch die Simulation liefern ähnliche Spannungsverläufe.

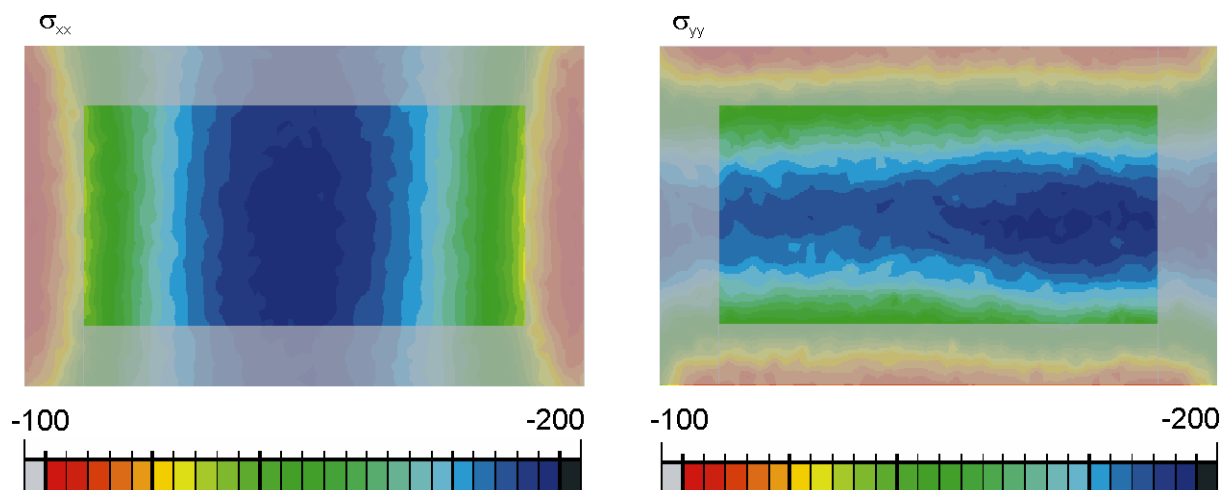


Abb.5-9: Simulation der Spannungsverläufe für die Komponenten  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  nach dem Thermoplast-Umspritzprozess (Quelle: Bosch)

Sowohl Theorie als auch Experiment zeigen für die y-Komponente eine starke Druckbelastung entlang der langen Chipmittelachse, die zu den Rändern hin etwas abnimmt. Für die y-Komponente wird laut Simulation eine homogene Druckbelastung entlang der kurzen Chipmittelachse prognostiziert. Die Experimente ergeben jedoch an der oberen Chipkante deutlich höhere Spannungsbeträge als an der unteren. Möglicherweise hat die Asymmetrie der Sekundärverpackung, die nur an der unteren Seite den Halter enthält, um den die Anschlüsse der Primärverpackung gebogen werden, einen stärkeren Einfluss auf die Spannungskomponente  $\sigma_{xx}$  als erwartet. Außerdem betrachtet die Simulation das PSSO4-Gehäuse zusammen mit dem Halter und den angelöteten Kabeln als ein festes System. Kleine Verschiebungen innerhalb dieses Systems könnten ebenfalls zu dem gemessenen unsymmetrischen Verlauf geführt haben.





# Kapitel 6

## Zusammenfassung

---

Diese Arbeit liefert einen entscheidenden Beitrag zur Quantifizierung der mechanischen Spannungen infolge der Verkapselung von Sensorbauelementen für die Automobilindustrie und stellt damit eine Basis für eine zuverlässige und sichere Kraftfahrzeugelektronik dar.

Mit einem neu entwickelten Mikrodiffraktometer gelang erstmalig eine röntgenographische Messung des dreidimensionalen mechanischen Spannungszustands von verpackten Siliziumchips unter Laborbedingungen. Messtechnische Herausforderungen durch die unzugängliche Chipoberfläche, die spezielle Probengeometrie und die Röntgenabsorption des Gehäuses wurden gelöst. Anhand von definiert eingepprägten Spannungszuständen in Siliziumwafern konnte der Aufbau validiert werden. Die Messunsicherheit für die einzelnen Komponenten des Spannungstensors wurde mit  $\pm 10$  MPa abgeschätzt.

Die Arbeit war Teil des Verbundprojekts „iForceSens“, in dem ein Kraftmesschip entstanden ist, der substituierend typische Verpackungsprozesse durchläuft und die dadurch eingepprägten Spannungen über den piezoresistiven Effekt misst.

Die Ziele des Teilvorhabens

1. die röntgenographische Bestimmung des vollständigen Spannungstensors an den verpackten Kraftmesschips und
2. die Verifikation der piezoresistiven Kraftsensorik

wurden erreicht.

Im Fokus der Untersuchungen stand die Verkapselung von Raddrehzahlsensoren. An der Primärverpackung und an der Sekundärverpackung wurden sowohl Röntgenbeugungsmessungen als auch elektrische Messungen erfolgreich durchgeführt. Beide Methoden ergaben qualitativ gut übereinstimmende Spannungsverläufe, insbesondere in den Normalspannungskomponenten in der Chipebene von Thermoplast umspritzten Bauelementen. Der Vergleich mit Simulationen hat gezeigt, dass die Geometrie des zu verpackenden Elementes die Spannungsentstehung während der Verkapselung entschieden beeinflusst. Die gemessenen Spannungswerte von  $-150$  MPa im PSSO4-Gehäuse und bis zu  $-200$  MPa durch das Thermoplast-Umspritzen zeugen von einer enormen Druckbelastung durch den Verpackungsprozess, die es in Zukunft zu reduzieren gilt.

Geplant ist, den unverpackten Chip gezielt zu verspannen, so dass die zuvor eingepprägten Belastungen durch die Verkapselung aufgehoben werden und am Ende der Fertigungsstrecke ein spannungsfreies Produkt vorliegt.

Die Röntgenbeugungsanalyse ist mit sieben Stunden sehr zeitaufwendig, sie stellt jedoch in der Verifikationsphase der piezoresistiven Messung eine unverzichtbare Vergleichsmethode dar. Denn im Gegensatz zu den Kraftmesschips, mit dem nur Aussagen über die Spannungen in der Chipebene getroffen werden können, ergibt die Röntgenmessung den vollständigen dreidimensionalen Spannungstensor.

Für ein umfassenderes Verständnis der Verpackungsprozesse, wäre die Entwicklung eine Kraftmesschips der zweiten Generation sehr interessant, mit dem auch Spannungsmessung senkrecht zur Chipoberfläche möglich wären.

Über das BMBF-Projekt hinaus steht das Mikrodiffraktometer Herstellern und Anwendern von endverpackten Sensoren aus Silizium für eine zerstörungsfreie orts aufgelöste Spannungsanalyse zur Verfügung. Durch den variabel gestalteten Probenraum können ohne apparative Neuentwicklungen und ohne Folgeinvestitionen Mikrosysteme in beliebig geformten Chipgehäusen charakterisiert werden.

# Literaturverzeichnis

---

- [1] ZVEI, Mikroelektronik-Trendanalyse bis 2011, (2007)
- [2] Bosch, *Autoelektrik Autoelektronik*, Vieweg, 351 ff (2002)
- [3] V. Hauk, *Structural and Residual Stress Analysis by Non-Destructive Methods*, Elsevier (1997)
- [4] P.C. Wang, G.S. Cargill III, I.C. Noyan, E.G. Liniger, C.K. Hu, K.Y. Lee, *X-Ray Microdiffraction for VLSI*, The Minerals, Metals & Materials Society's, Professional Preface, **4**, 4 (1996)
- [5] P.J. McNally, R. Rantamäki, T. Tuomi, A.N. Danilewsky, D. Lowney, J.W. Curley, P.A.F. Herbert, *Mapping of Mechanical, Thermomechanical and Wire-Bond Strain Fields in Packaged Si Integrated Circuits Using Synchrotron White Beam X-Ray*, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, **24**, 76 (1997)
- [6] B.R. Müller, M. Harwardt, M.P. Hentschel, A. Lange, P. Alpern, R. Tilgner, *Sichere Automobil elektronik durch nanogenaues Synchrotron-Prüfverfahren*, DGZfP-Jahrestagung, Vortrag 29 (2007)
- [7] Statistisches Bundesamt Deutschland, *Zahl der Verkehrstoten: Neuer Tiefststand im Jahr 2008*, Pressemitteilung Nr. 479 vom 12.12.2008
- [8] C. Treutler, H. Siegle, *Dünnschicht-Magnetsensoren für Kfz-Anwendungen*, Vieweg, tm **68**, 282 (2001)
- [9] R. Hull, *Properties of Crystalline Silicon*, Institution of Engineering and Technology, 93 (1999)
- [10] D.R. Lovett, *TENSOR PROPERTIES OF CRYSTALS*, Adam Hilger, 56-57 (1989)
- [11] J.F. Nye, *Physical Properties of Crystals*, Oxford University Press, 83 (1985)
- [12] L. Spieß, R. Schwarzer, H. Behnken, G. Teichert, *Moderne Röntgenbeugung*, Teubner, 295-310 (2005)
- [13] C.S. Smith, *Piezoresistive Effect in Germanium and Silicon*, Phys. Rev. **94**, 42-49 (1954)

- [14] J.L. Spencer, W.H. Schroen, G.A. Bednarz, J.A. Brya, T.D. Metzgar, R.D. Cleveland, D.R. Edwards, *New quantitative measurements of IC stress introduced by plastic packages*, Proc. 19th IEEE Annual Reliability Physics Symposium, 74-80 (1981)
- [15] A.P. Dorey, T.S. Maddern, *The effect of strain on MOS transistors*, Solid-State Electronics, **12**, 185-189 (1969)
- [16] R.C. Jaeger, J.C. Suhling, R. Ramani, A.T. Bradley, J. Xu, *CMOS stress sensors on (100) silicon*, IEEE Journal of Solid State Circuits, **35**, 85-95 (2000)
- [17] iForceSens, 2. Zwischenbericht, Bosch, 13-14 (2006)
- [18] iForceSens, Ergebnisüberblick, Bosch, 6 (2007)
- [19] F. Heuck, E. Macherauch, *Forschung mit Röntgenstrahlen*, Springer, 473 (2005)
- [20] I.C. Noyan, J.B. Cohen, *Residual Stress*, Springer, 117-118 (1987)
- [21] T. Imura, S. Weissmann und J.J. Slade, *A study of Age-Hardening of Al-3.85% Cu by Divergent X-ray beam Method*, Acta. Cryst. **15**, 786-793 (1962)
- [22] R. Hull, *Properties of Crystalline Silicon*, Institution of Engineering and Technology, 98 (1999)
- [23] J.J. Hall, *Electronic Effects in the Elastic Constants of n-type Silicon*, Phys. Rev. **161**, 756 (1967)
- [24] D.R. Kreger, *An x-ray study of waxy coating from plants*, Recl. Trav. Bot. Neerlandais **41**, 606-736 (1948)
- [25] P. Engström, S. Larsson, A. Rindby, B. Stocklassa, *A 200  $\mu\text{m}$  X-ray microbeam spectrometer*, Nucl. Instrum. Methods B **36**, 222-226 (1989)
- [26] D. Bilderback, *Review of capillary x-ray optics of the 2nd International Capillary Optics Meeting*, X-Ray Spectrom. **32**, 195-207 (2003)
- [27] A. Bjeoumikhov, S. Bjeoumikhova, R. Wedell, *Capillary Optics in X-Ray Analytics*, Part. Part. Syst. Charact. **22**, 384-390 (2006)

- [28] L. Vincze, K. Janssens, F. Adams, A. Rindby, P. Engström, *Interpretation of capillary generated spatial and angular distributions of x-rays: theoretical modeling and experimental verification using the European Synchrotron Radiation Facility Optical beam line*, Rev. Scient. Instrum. **69**, 3494-3503 (1998)
- [29] W.L Bond, *Precision Lattice Constant Determination*, Acta. Cryst. **13**, 814 (1960)
- [30] M.O. Krause and J.H. Oliver, J. Phys. Chem. Ref. Data **8**, 332 (1979)
- [31] S. Popović, *An X-ray Diffraction Method for Lattice Parameter Measurements from Corresponding  $K\alpha$  and  $K\beta$  Reflexions*, J. Appl. Cryst. **4**, 240 (1971)
- [32] I.C. Noyan, J.B. Cohen, *Residual Stress*, Springer (1987)
- [33] J.A. Bearden, *X-ray Wavelengths*, Rev. Mod. Phys. **39**, 76-99 (1967)
- [34] B.E. Warren, *X-ray Diffraction*, Addison-Wesley, 290 (1969)



# Danksagung

---

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen beiden Doktorvätern Herrn Prof. Dr. Ernst Otto Göbel und Prof. Dr. Andreas Hangleiter, die sich beide sofort bereit erklärten, die Betreuung meiner Promotion zu übernehmen und deren Entwicklung stets mit großem Interesse begleitet haben.

Herrn Dr. Fritz Riehle danke ich für die hervorragende Förderung von Doktoranden innerhalb der Abteilung „Optik“.

Ich danke allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe „Röntgenoptik“, durch die ich immer in Freude auf diese Zeit zurückblicken werde. Das Arbeitsklima war stets durch eine freundliche Atmosphäre und einen fantastischen Zusammenhalt geprägt. Insbesondere danke ich Herrn Dr. Peter Becker für den sanften Druck, diese Arbeit zu einem erfolgreichen Ende zu führen. Ein großes Dankeschön möchte ich an Herrn Dr. Ulrich Kuetgens richten für seine motivierende Unterstützung. Wertvolle Diskussionen und Ideen haben wesentlich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen. Des weiteren bedanke ich mich bei Herrn Dr. Birk Andreas, Herrn Dieter Schulze, Herrn Jens Hauffe, Herrn Lutz Wietschorke, Herrn Hans-Wilhelm Ehlers und Herrn Alexander Schütt für den Rückhalt und ihre verlässliche Hilfsbereitschaft.

Der Arbeitsgruppe um Prof. Dr. Donald Bilderback von der „Cornell High Energy Synchrotron Source (CHESS)“ danke ich für die kollegiale Unterstützung in Bezug auf die Glaskapillaren.

Diese Arbeit wurde durch das BMBF im Rahmen des Projektes „iForceSens“ finanziell gefördert. Allen Projektpartnern spreche ich meinen Dank für die gute Kooperation aus.

Der „Braunschweig International Graduate School of Metrology (IGSM)“ danke ich für die fächerübergreifenden Anregungen im Rahmen des Promotionsstudiums.

Für die Ermutigung zur Promotion und den Zuspruch in meinem bisherigem Leben bedanke ich mich sehr bei meiner Familie.

Ein ganz besonders herzlicher Dank geht an meine große Liebe Jens Weißbrodt, der mir in jeder Situation bedingungslos zur Seite steht. Du bist ein wunderbarer Schatz!